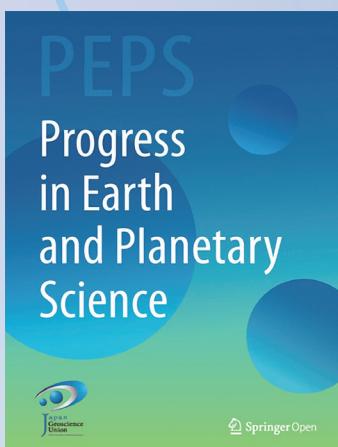


Review 論文要旨集

# Progress in Earth and Planetary Science



(第一版:論文出版年度 2014年4月~2021年1月)



日本地球惑星科学連合 (JpGU) Open Access journal  
<https://progearthplanetsci.springeropen.com/>



# 目 次

## 1. Space and planetary sciences

中緯度 SuperDARN レーダー網の成果のレビュー .....	2
地球近傍の宇宙空間でおこる擾乱のシミュレーション：1. 磁気嵐 .....	3
地球近傍の宇宙空間でおこる擾乱のシミュレーション：2. オーロラ・サブストーム .....	4
はやぶさ2到着以前の小惑星リュウグウ .....	5
赤道及び低緯度における真夜中過ぎ電離圏擾乱の発生機構に関するレビュー .....	6
日没後の赤道電離圏 F 領域高度上昇—それとも上昇流の成長か？ .....	7
赤道スプレッド F 生成に対する日没後の鉛直プラズマ・ドリフト速度の影響 .....	8
シンチレーション評価と予測に向けた赤道電離圏プラズマバブルの数値シミュレーション研究に関するレビュー .....	9
火星のコアの構造一簡潔なレビューと InSight に期待される新たな知見— .....	10
極端地磁気誘導電流のレビュー .....	11
光球面磁場に基づいた太陽コロナ磁場と太陽プラズマ噴出現象の電磁流体モデリング .....	12
高度50-110km 領域の力学と構造の研究のための中波および短波レーダー技術のレビュー .....	13
太陽地球結合系の気候・天気に関する国際共同研究プロジェクト（CAWSES II）の総括 .....	14
次世代欧州非干渉散乱レーダー（EISCAT_3D）のサイエンスケース .....	15
太陽地球システムの短期変動：CAWSES-II 期間に得られた成果の概略 .....	16
国際研究計画のための e サイエンスと情報学 .....	17
太陽が気候変動に与える影響は何だろうか？ CAWSES-II 期間中の研究活動の概観 .....	18
気候変動に対する中間圏-熱圏-電離圏システムの応答と CAWSES-II の貢献 .....	19
下層大気からの入力に対するジオスペースの応答：CAWSES-II タスクグループ4の成果 .....	20

## 2. Atmospheric and hydropheric sciences

気候学際研究モデル (MIROC) を中心とした地球システムモデリングの20年 .....	22
d4PDF：地球温暖化リスク評価のための大規模アンサンブル高解像度気候モデルシミュレーション .....	23
非静力学領域の大気大循環モデルの力学：全球非静力学大気モデル比較実験 .....	24
全球非静力学大気モデルによる雲プロセスに関する気候感度の不確実性の低減 .....	25
地球の気候を支配する海大陸の海岸線 .....	26
スーパーコンピュータ「京」を用いた高解像度全球非静力学大気シミュレーションの成果と挑戦 .....	27
山岳域における大気化学観測に関する総説 .....	28
放射強制力に対する地球平均地上気温の過渡的応答に関する理解の現状 .....	29
雲解像モデルへのダウンスケーリング型エアロゾル導入システム（ALCIS）開発レビュー .....	30
中間圏および下部熱圏の力学：レビュー .....	31
IPCC AR5における地球システムモデリングとこれから .....	32
非静力学正20面体格子大気モデル NICAM: 概要および開発 .....	33

### **3. Human geosciences • Biogeosciences**

ヒ素の循環と汚染.....	36
地球温暖化と海洋酸性化への海洋の石灰化生物の応答に関する展望	
一高二酸化炭素濃度下での「温暖地球」におけるサンゴと有孔虫の挙動一 .....	37
海底熱水の物理・化学的多様性が熱水生態系に及ぼす影響についての理論的考察 .....	38
環境研究および生態学研究において炭素・窒素同位体比を利用するための生化学的・生理学的基礎 .....	39

### **4. Solid earth sciences**

地球型惑星の強度モデルに基づいたリソスフェアの構造と進化の考察 .....	42
マントル深部での融解, 全地球規模での水の循環と海水量の安定性への影響 .....	43
核—マントル結合系の進化：レビューと将来展望について .....	44
水素によって促進された鉱物の電気伝導度について .....	45
繰り返し地震の検出と断層スロースリップ推定への応用 .....	46
緊急地震速報：“強震が到達するまでの数秒間”が意味することは? .....	47
GNSS データの非線形ダイナミクス解析：定量化, 先行現象と同期現象 .....	48
カリフォルニアフランシスカンコンプレックスにおける海洋プレート層序の構造的形態と変化： メランジュの起源と沈み込み - 付加過程に関する知見 .....	49
スラブ変成作用の地震波によるイメージングと稍深発スラブ内地震の発生原因 .....	50
高圧下での三次元イメージング：GSECARS ビームラインでの高圧 X 線マイクロトモグラフィー開発に おけるこの10年 .....	51
伊豆・小笠原・マリアナ弧の沈み込み初期過程に着目したフィリピン海プレートの誕生, 進化, 消滅 .....	52
沈み込み帯前弧におけるマントルの加水作用と塩素に富む流体 .....	53
地球型惑星や衛星の中心核固化様式とダイナモ活動への示唆： 鉄の雪が降り硫化鉄が浮き上がる内核成長 .....	54
より現実的なコアーマントル境界の熱流束パターンへ向けて：惑星ダイナモの多様性の原因 .....	55
高圧における金属鉄の音速：その実験的制約と外挿, そして地震学モデルとの比較 .....	56
付加体中の断層岩から洞察した沈み込み帯における地震断層運動 .....	57
高温高圧下における熱水流体とマグマの相互作用 .....	58

### **5. Interdisciplinary research**

結合ライブラリ Jcup3: その思想と応用 .....	60
異なる空間スケールにおける岩盤河床の地形計測と地形学的文化遺産の研究のための応用 .....	61
北ユーラシア未来イニシアティブ (NEFI) : 21世紀における全球変化に向けた挑戦と道筋 .....	62
ヒマラヤ西部における新生代気候とテクトニクス .....	63
後期鮮新世から前期更新世における地球規模の気候変動および地域的な構造運動に関連した 日本海の微化石群集変化 .....	64
アジア・モンスーンの進化と変動, ヒマラヤ・チベット高原隆起とのリンクエージの可能性 .....	65
海洋堆積物中に分散した火山灰を定量するための地球化学的アプローチ .....	66
沖縄トラフにおける表層水温プロキシ（アルケノン, 有孔虫 Mg/Ca, 浮遊性有孔虫群集）と その古海洋学的意味合い .....	67
古海洋学・古気候学研究への海底テフラの利用：日本海堆積物を例として .....	68
鮮新世から現世までの黒潮と対馬海流の歴史：マルチプロキシアアプローチ .....	69

## Review

## Space and planetary sciences

## 中緯度 SuperDARN レーダー網の成果のレビュー

西谷 望, Ruohoniemi JM, Lester M, Baker JBH, Koustov AV, Shepherd SG, Chisham G, 堀 智昭, Thomas EG, Makarevich RA, Marchaudon A, Ponomarenko P, Wild JA, Milan SE, Bristow WA, Devlin J, Miller E, Greenwald RA, Ogawa T, Kikuchi T

### Review of the accomplishments of Mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF Radars

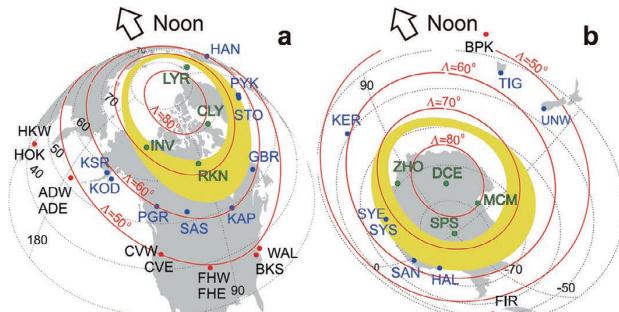
Nishitani N, Ruohoniemi JM, Lester M, Baker JBH, Koustov AV, Shepherd SG, Chisham G, Hori T, Thomas EG, Makarevich RA, Marchaudon A, Ponomarenko P, Wild JA, Milan SE, Bristow WA, Devlin J, Miller E, Greenwald RA, Ogawa T, Kikuchi T

**[Keywords]** Mid-latitude SuperDARN, Ionosphere, Magnetosphere, Convection, Ionospheric irregularities, HF propagation analysis, Ion-neutral interactions, MHD waves

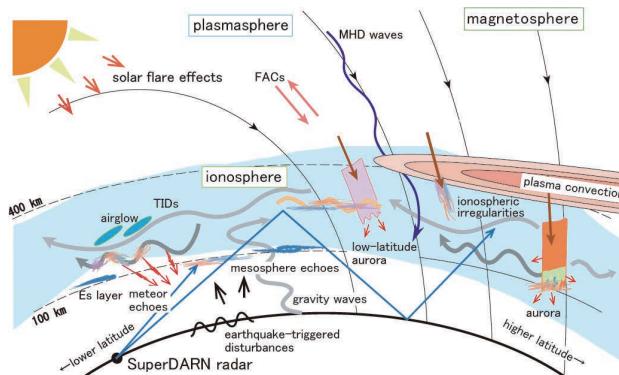
大型短波レーダーの広域観測網である Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) は、短波帯の電波を用いて電離圏プラズマの対流速度やプラズマ密度変動の全地球的な分布を1–2分程度の高時間分解能で提供する観測網であり、電離圏・磁気圏・超高層大気のダイナミクスや宇宙天気の基本原理を理解するために必要不可欠な存在である。1995年の本格的な運用開始以降の10年間においては、SuperDARN レーダーは高緯度にのみに設置されており、これに従い研究成果はオーロラ発光域を中心とする高緯度領域に限定されていた。一方、オーロラ帯より十分低緯度側、磁気緯度にして約50度より低緯度側にレーダーを設置すれば今まで観測できなかった領域をカバーできるようになり、新しい研究テーマの開拓につながる可能性が高いことが、早くから複数の研究グループにより指摘されていた。この指摘に基づき、2005年から順次北アメリカや日本を中心とする中緯度域に SuperDARN レーダーが設置され始め、現在では南北両半球合あわせて10数基の中緯度 SuperDARN レーダーが継続的に観測を実施している。本レビュー論文においては、2017年1月に名古屋大学で開催した国際ワークショップにおける議論の結果に基づき、中緯度 SuperDARN レーダーを活用した最近十数年の研究成果を次の5つの大テーマに分類してまとめている。

1. 電離圏プラズマ対流。
2. 電離圏プラズマ不規則構造。
3. 短波帯電波の伝搬過程の解析。
4. 電離圏プラズマ・超高層大気の相互作用。
5. 磁気流体波動。

加えて本論文では、今後の研究の方向についても議論を行っている。さらには、SuperDARN の基本的観測原理や中緯度 SuperDARN レーダーの経緯を中心とする過去の歴史に関する記述もあり、SuperDARN グループ外の研究者やこれからデータを使用しようとする初心者にとって教科書的な存在になりうる論文である。



南北両半球における SuperDARN レーダーサイトの配置図。緑色が極冠域 SuperDARN レーダーサイト、青色がオーロラ帯 SuperDARN レーダーサイト、黒色が中緯度 SuperDARN レーダーサイトである。黄色は経験モデルに基づくオーロラ発光域の位置。



SuperDARN レーダーの観測対象となる自然現象の模式図。

日本語原稿執筆者：西谷 望（名古屋大学宇宙地球環境研究所）（敬称略）

論文出版日：2019/3/18

<https://doi.org/10.1186/s40645-019-0270-5>



## 地球近傍の宇宙空間でおこる擾乱のシミュレーション：1. 磁気嵐

海老原 祐輔

## Simulation study of near-Earth space disturbances: 1. Magnetic storms

Ebihara Y.

**[Keywords]** Magnetic storms, Computer simulation, Magnetosphere, Ionosphere, Inner magnetosphere, and Ring current.

磁気嵐は汎地球規模でおこる地磁気の乱れである。一般に磁気嵐は2～3日間続き、大きな磁気嵐では地上の磁場が約1%減ることもある。地磁気が乱れる原因は主に地球を取り囲むように流れる赤道環電流にある。宇宙空間には電流を流しやすい導線があるわけではない。電気を帯びた粒子（荷電粒子）が空間中を動くことで電流が流れるのである。赤道環電流の場合、地球近くの宇宙空間に集まつたイオンが運動することで巨大な電流を維持している。磁気嵐が発達する期間（主相）では地球近傍にイオンが多く集まり、回復する期間（回復相）ではイオンが散逸する。こうしたイオンの消長を理解することが磁気嵐を理解することの本質であるが、複雑なイオンの運動を把握するのは難しい。そ

こでシミュレーションが威力を発揮する。地球磁場を双極子と見立て、磁気圏にかかる大規模な対流電場、自転する地球によって生じる回転電場のもとでイオンの運動を追跡すると、概ね赤道環電流の発達を説明することができる。対流電場は惑星間磁場が南を向き、太陽風速度が高いときに発達する。太陽表面から放出された高温プラズマの塊（コロナ質量放出）や惑星間空間における回転相互作用領域には強い南向きの磁場と高速太陽風が含まれていることが多い。これらの構造が地球に到来し、条件が良ければ対流電場が発達し、赤道環電流が発達することになる。一方でイオンの消失過程はよく分かっていない。中性大気との電荷交換反応でイオンが失われるためと長らく考えられていたが、消失率を計算すると赤道環電流の回復時間を説明できないことが指摘され、未解決問題となっている。

赤道環電流の興味深い点として、その能動的な役割があげられる。赤道環電流が地球近傍の宇宙空間の磁場を大きく変えることは、その一例である。磁場が変わると地球磁場に捕らえられている全ての荷電粒子の分布を大きく変えてしまう。放射線帯粒子のフラックスが一時的に減少する「赤道環電流効果」は、その顕著な例である。また、赤道環電流で閉じることができない電流は磁力線に沿って地球の電離圏（高さ数100キロメートル付近にある一部が電離した超高層大気）に流れ込み、電離圏の擾乱を引き起こす。電離圏で電流を閉じるために発生した電場は宇宙空間に伝わっていく。この電場は赤道環電流を担う荷電粒子をはじめ、地球近傍の粒子の運動を変える。本論文では、赤道環電流の発達と消失、そして赤道環電流の能動的な役割（領域間結合・エネルギー階層間結合）についてレビューする。

---

日本語原稿執筆者：海老原 祐輔（京都大学 生存圏研究所）（敬称略）

論文出版日：2019/2/13  
<https://doi.org/10.1186/s40645-019-0264-3>



## はやぶさ2到着以前の小惑星リュウグウ

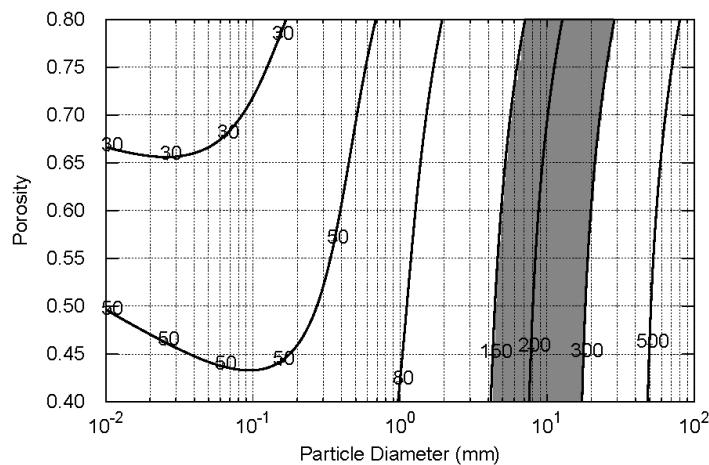
和田 浩二, Matthias Grott, Patrick Michel, Kevin J. Walsh, Antonella M. Barucci, Jens Biele, Jürgen Blum, Carolyn M. Ernst, Jan Thimo Grundmann, Bastian Gundlach, Axel Hagermann, Maximilian Hamm, Martin Jutzi, Myung-Jin Kim, Ekkehard Kührt, Lucille Le Corre, Guy Libourel, Roy Lichtenheldt, Alessandro Maturilli, Scott R. Messenger, 道上 達広, 宮本 英昭, Stefano Mottola, Thomas Müller, 中村 昭子, Larry R. Nittler, 小川 和律, 岡田 達明, Ernesto Palomba, 坂谷 尚哉, Stefan E. Schröder, 千秋 博紀, Driss Takir, Michael E. Zolensky and International Regolith Science Group (IRSG) in Hayabusa2 project

### Asteroid Ryugu before the Hayabusa2 encounter

Wada K, Grott M, Michel P, Walsh K, Barucci A, Biele J, Blum J, Ernst C, Grundmann J, Gundlach B, Hagermann A, Hamm M, Jutzi M, Kim M, Kührt E, Le Corre L, Libourel G, Lichtenheldt R, Maturilli A, Messenger S, Michikami T, Miyamoto H, Mottola S, Müller T, Nakamura A, Nittler L, Ogawa K, Okada T, Palomba E, Sakatani N, Schröder S, Senshu H, Takir D, Zolensky M and International Regolith Science Group (IRSG) in Hayabusa2 project

[Keywords] Hayabusa2, Ryugu, Asteroids, Regolith, Physical properties

小惑星162173「リュウグウ」は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）主導の小惑星サンプルリターンミッション「はやぶさ2」の探査対象天体である。はやぶさ2による探査以前の地上観測からは、リュウグウについて直径1km以下の地球近傍C型小惑星であるということのほかは、極めて限られた情報しか得られていなかった。本論文は、はやぶさ2探査以前における地上観測や理論モデルに基づいて、リュウグウの最も確からしい物理的・力学的性質について、とくに試料採取にあたって重要なリュウグウ表層の特徴を中心にまとめたものである。この情報は、はやぶさ2到着以前のリュウグウについての基準モデルをなすものであり、本論文では、自転軸やスペクトル情報などの全球的性質、熱慣性などの表層熱物理的性質、空隙率や強度などの表層力学的性質、にわけてそれぞれ観測値・導出値・予測値を記述している。この基準モデルは探査運用計画の策定に役立つほか、はやぶさ2で得られるデータをより適切に解釈しリュウグウをはじめとした小天体についての科学的研究を促進し、小天体から探る太陽系進化の理解に貢献するものである。なお、はやぶさ2の探査によって本論文の価値が失われるものではない。本論文は、C型小惑星一般について現状の理解を整理したものとも言える。結果的に、はやぶさ2の成果をより鮮明にすることのほか、将来の小天体探査を計画するにあたっておおいに参考となるであろう。



レゴリス層の代表的粒径と空隙率の関数として表示した熱慣性（単位： $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot K^{-1}$ ）の等高線マップ（計算上仮定したパラメータセットについては本文参照）。灰色の領域は、地上観測（Müller et al. 2017）から推定されたリュウグウの熱慣性の範囲を示す。この図からリュウグウのレゴリス層の代表的粒径を推定することが可能となる。

日本語原稿執筆者：和田 浩二（千葉工業大学 惑星探査研究センター）（敬称略）



## 赤道及び低緯度における真夜中過ぎ電離圏擾乱の発生機構に関するレビュー

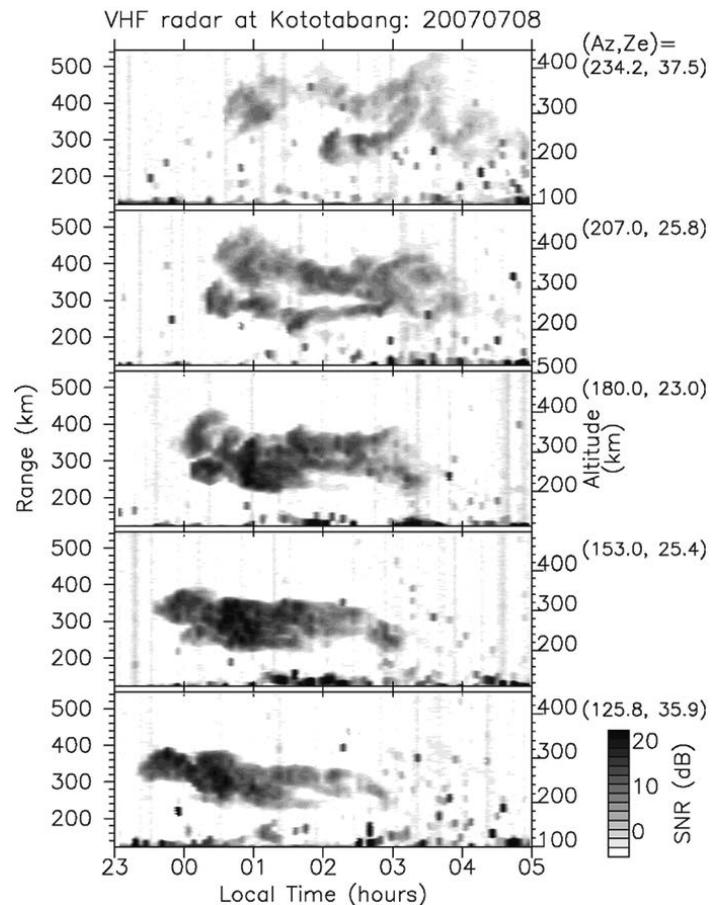
大塚 雄一

### Review of the generation mechanisms of post-midnight irregularities in the equatorial and low-latitude ionosphere

Otsuka Y

[Keywords] Equatorial ionosphere, Ionospheric irregularity, Rayleigh–Taylor instability, Plasma bubble

地球の磁場が水平になる赤道域では、赤道電離圏特有の不安定現象が起こる。その一つとして、局所的に電離圏プラズマが著しく減少する「プラズマバブル」と呼ばれる現象があげられる。プラズマバブルの内部にはプラズマの粗密構造ができるため、プラズマバブル内を通る電波は影響を受ける。例えば、GPSを使った衛星測位には位置誤差をもたらし、衛星通信・放送に対して受信障害を引き起こす。このため、これまで観測的、理論的に多くの研究がなされ、プラズマバブルは日没線が地球の磁力線と平行になる季節（地球磁場の偏角が小さいアジア域では、春と秋）の日没直後に頻繁に発生することが明らかにされている。また、プラズマバブルの発生は、太陽活動にも依存しており、太陽活動が活発な時ほど発生頻度が高いことも知られている。しかし、近年のインドネシアや、インド、ブラジルでのレーダー観測や、電離圏を飛翔する人工衛星によって、従来から知られていたプラズマバブルの発生時期とは異なり、太陽活動極小期において、北半球の夏季の真夜中過ぎに、プラズマバブルに起因すると考えられる電離圏擾乱が頻繁に観測されることが明らかになった。プラズマバブルが発生するためには、(1) 電離圏の状態が不安定を成長させる状態にあること、(2) 不安定が成長するための“タネ”になる初期変動が存在すること、が必要である。(1) については、真夜中に熱圈温度が上昇する現象に伴う極向きの熱圈風が電離圏プラズマを高高度に持ち上げることにより、電離圏が不安定な状態になることが有力視されている。(2) に関しては、熱帯の活発な対流活動により生じた大気波動が上方伝搬し、電離圏プラズマの変動を作ると考えられている。本論文では、真夜中過ぎに出現する電離圏擾乱に関する観測的研究を中心にレビューし、プラズマバブルが真夜中過ぎに発生する機構について議論する。



インドネシアに設置されたVHFレーダーで、2007年8月21日晚に観測されたF領域沿磁力線不規則構造(FAI)エコーのレンジ・時間断面図(Otsuka et al. 2009より)。

日本語原稿執筆者：大塚 雄一（名古屋大学 宇宙地球環境研究所）（敬称略）

論文出版日：2018/9/20

<https://doi.org/10.1186/s40645-018-0212-7>



## シンチレーション評価と予測に向けた赤道電離圏プラズマバブルの数値シミュレーション研究に関するレビュー

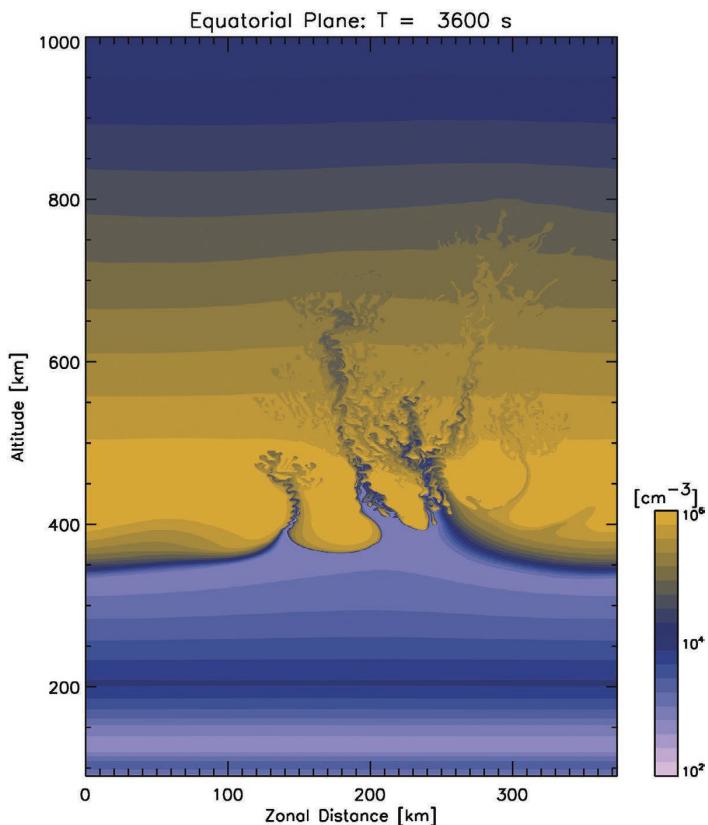
横山 竜宏

### A review on the numerical simulation of equatorial plasma bubbles toward scintillation evaluation and forecasting

Yokoyama T

**[Keywords]** Equatorial ionosphere, Equatorial spread F, Equatorial plasma bubbles, Numerical simulation, Scintillation, High-performance computing, Space weather

地球電離圏は、下層大気と宇宙空間を繋ぐ遷移領域であると同時に衛星電波が遅延等の影響を受ける伝搬経路でもある。GPS等を利用した高精度、高信頼度の航法、測位が実用化されつつあり、電離圏による電波遅延の影響は大きな誤差の要因となる。特に、局所的なプラズマ密度の不規則構造を伴う電離圏擾乱が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動（シンチレーション）が生じるため、GPS等による電子航法に深刻な障害を及ぼす。このような電離圏擾乱の発生機構を解明し、発生を事前に予測することが、科学・実用の両面から求められている。赤道電離圏で発生するプラズマバブルと呼ばれる現象は、深刻なシンチレーションを引き起こす原因として知られているが、その発生機構については未だ未解明な部分が多く、特に発生の予測は非常に難しい。プラズマバブルに伴う電離圏擾乱の空間スケールは、数千kmにわたる地球規模の変動から、1m以下の微細な変動にまでわたっている。GPSで利用されている周波数帯（約1.2-1.5GHz）では、300-400mスケールの不規則構造によるフレネル回折によって干渉し、地上において振幅と位相が激しく変動する。このような数百mスケールの構造は、電離圏内で直接形成されるわけではなく、それよりも大スケールの構造がある種のプラズマ不安定を起源としてまず形成され、そこから非線形過程を経て小スケールの構造に至ると考えられている。このような幅広いスケールにわたる現象を解明するためには、数値シミュレーションを用いた研究が必要不可欠である。近年の計算機性能の進歩により、数百kmスケールの大規模構造とシンチレーションを引き起こす数百mスケールの微細構造を、同一モデル内でコンシスティントに再現できる可能性が高まってきた。本レビューでは、過去40年間の数値シミュレーションによるプラズマバブル研究の発展を概観し、シンチレーションの発生予測に向けたシミュレーション研究の最前線について紹介する。



赤道プラズマバブルの数値シミュレーション結果の一例

日本語原稿執筆者：横山 竜宏（情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室）（敬称略）

論文出版日：2017/12/12

<https://doi.org/10.1186/s40645-017-0153-6>



Review

Space and planetary sciences

## 次世代欧州非干渉散乱レーダー（EISCAT\_3D）のサイエンスケース

McCrea I, Aikio A, Alfonsi L, Belova E, Buchert S, Clilverd M, Engler N, Gustavsson B, Heinzelman C, Kero J, Kosch M, Lamy H, Leyser T, 小川泰信, Oksavik K, Pellinen-Wannberg A, Pitout F, Rapp M, Stanislawska I, Vierinen J

### The science case for the EISCAT\_3D radar

McCrea I, Aikio A, Alfonsi L, Belova E, Buchert S, Clilverd M, Engler N, Gustavsson B, Heinzelman C, Kero J, Kosch M, Lamy H, Leyser T, Ogawa Y, Oksavik K, Pellinen-Wannberg A, Pitout F, Rapp M, Stanislawska I, Vierinen J

**[Keywords]** EISCAT, EISCAT\_3D, Radar, Incoherent scatter, Atmospheric science, Space physics, Plasma physics, Solar system research, Space weather, Radar techniques

欧州非干渉散乱（EISCAT）科学協会は、高緯度のさまざまな超高層大気研究に利用可能な非干渉散乱（IS）レーダー施設を、スカンジナビア半島北部とスバルルバルの2ヶ所に設置し、運用してきた。そのうち、1980年代初めにスカンジナビア半島北部に設置されたISレーダーは、30年上前の技術に基づいているため、よりフレキシブルな観測装置を追加装備することが、現在求められている。特に、対流圏から電離圏上部までの広い高度領域において、3次元かつ

立体的に物理量が得られることや、連続観測が可能であることが不可欠な条件として挙げられる。

そのような世界をリードするISレーダー施設を利用して、将来の科学研究を促進するための新たなレーダーシステム計画（EISCAT\_3D）の検討が進められた。まず2005～2009年にデザインスタディを行い、その後2010～2014年に準備フェーズのプロジェクトを実施した。これらは欧州連合（EU）の大型研究枠組み計画（FP-6およびFP-7）による資金提供を受けて進められ、今後2020年代初頭にEISCAT\_3Dレーダーの第1段階の稼働を目指している。この新たなレーダー施設では、フェーズドアレイ方式と、高度なソフトウェアおよびデータ処理技術を用いる。この種の“ソフトウェア・レーダー”は、世界中のISレーダー観測施設の草分けということができる。このレーダー施設は、EISCAT\_3D科学コミュニティから集められた多くの科学課題の解決に役立つだけでなく、宇宙天気に関連する諸問題や人工衛星利用などの宇宙技術に依存する現代社会に対しても有益である。このレーダーは、オーロラオーバル内かつ成層圏極渦の端に位置するため、大気の長期変動や地球規模の大気変動の研究にも最適である。

本論文は、EISCAT\_3D準備フェーズプロジェクトの一環で作成した、EISCAT\_3Dのサイエンスケースの要約版である。本論文は、EISCATユーザーコミュニティから選抜した3つの国際サイエンスワーキンググループによって執筆された。本論文の共著者として記載したワーキンググループメンバーに加え、多くのEISCAT科学コミュニティメンバーによるディスカッションやサポートなどの貢献に感謝する。

日本語原稿執筆者：小川泰信（国立極地研究所）（敬称略）

論文出版日：2015/7/29  
<https://doi.org/10.1186/s40645-015-0051-8>



## Review

## Atmospheric and hydrographic sciences

## 気候学際研究モデル (MIROC)を中心とした地球システムモデリングの20年

河宮 未知生, 羽島 知洋, 立入 郁, 渡辺 真吾, 横畠 徳太

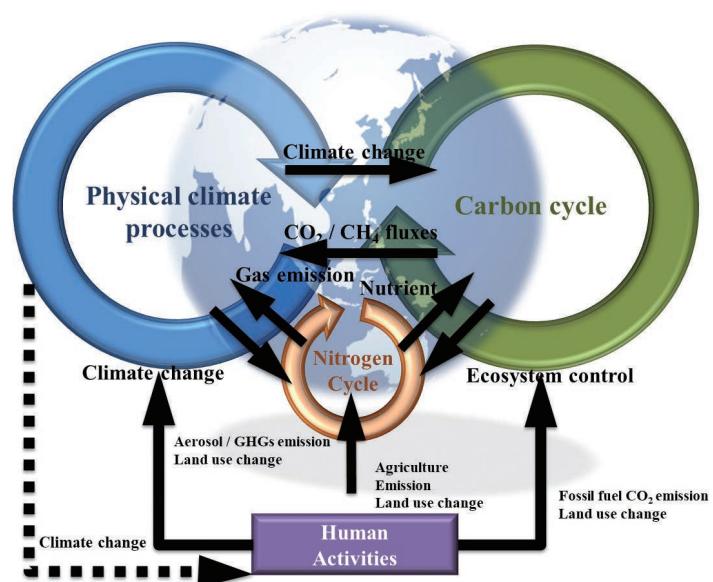
## Two decades of Earth system modeling with an emphasis on Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC)

Michio Kawamiya, Tomohiro Hajima, Kaoru Tachiiri, Shingo Watanabe, Tokuta Yokohata

**[Keywords]** Earth system model, Climate change, IPCC, Carbon cycle, Biogeochemistry, Interdisciplinary project, Remaining carbon budget, Socioeconomics, Nitrogen, Iron.

本論文では、日本で開発された MIROC（気候学際研究モデル）に基づく地球システムモデル（ESM）の成果を中心に、過去20年間の ESMによる研究を概観する。ESMとは、炭素循環などの生物地球化学的プロセスを組み込んだ気候モデルである。ESMの開発は、気候変動と炭素循環のフィードバックの研究が契機となっている。最新の ESMは、初期の ESM に比べてはるかに現実的なものとなっており、大気化学や窒素・鉄の循環、大気中のダストや河川による栄養塩の輸送など、炭素以外の様々な生物地球化学的プロセスが含まれるようになっている。ESMは気候変動緩和目標に見合った二酸化炭素排出量の評価など、多くの実用的な課題に利用され、気候変動緩和政策の立案には欠かせないツールといえる。また、社会経済と地球システムの結合系の研究や、炭素循環の10年規模予測など、ESMを利用した新たな野心的な取り組みも進んでいる。ESMの改良のためには、

気候科学に関する様々な分野を統合する活動をさらに推し進める必要がある。ESMの新たな応用は有意義な洞察をもたらす可能性があり、気候科学以外の分野、例えば社会経済学分野との連携を拡大することを指向すべきである。



地球システムモデル (ESM) による地球変動予測の概念図：

人為的な温室効果ガスの排出や窒素固定が増加している。ESMを用いることで、気候変動と生物地球化学サイクルの相互作用をモデル化することが可能になった。

日本語原稿執筆者：河宮 未知生（海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター）（敬称略）

論文出版日：2020/10/20

<https://doi.org/10.1186/s40645-020-00369-5>

## Review

## Atmospheric and hydrographic sciences

## d4PDF：地球温暖化リスク評価のための大規模アンサンブル高解像度気候モデルシミュレーション

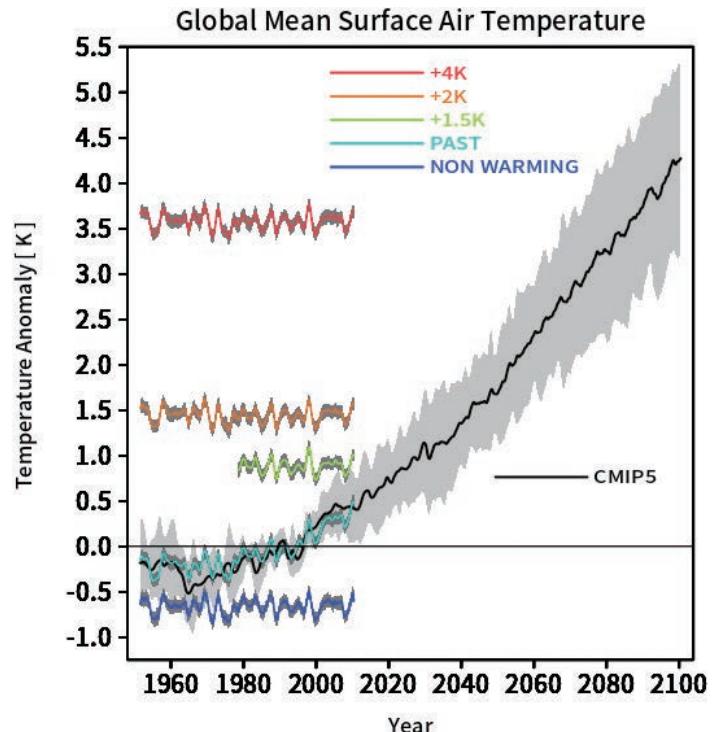
石井 正好, 森 信人

## d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment

Masayoshi Ishii, Nobuhito Mori

**[Keywords]** Global warming, d4PDF, ensemble climate simulation, atmospheric model, dynamical downscaling, detection and attribution, impact assessment, climate change adaptation, natural hazard, storm surge

現在、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）」として公開している大規模気候シミュレーションデータベースは、気候変化に伴うリスク評価を行えるように作成されたものである。2015年時点で完了した計算結果を公開して以後も、本データベースは拡張を続けている。本データベースには、高解像度全球および領域大気モデル（解像度はそれぞれ 60km と 20km）による、のべ数千年のアンサンブル過去・将来気候シミュレーション結果が含まれている。将来シミュレーションは、産業革命以前から全球平均地表面気温が 4K, 2K, そして 1.5K 上昇した気候状態を設定して行われている。地球温暖化が生じていない、つまり 20世紀初頭の気候状態が現在まで継続していると想定した気候シミュレーション実験出力も d4PDF には含まれている。実験データの総量は約2ペタバイトである。使用した大気モデルは、気候値や、自然変動、豪雨や台風などの極端現象について、過去気候の特徴を良く再現している。データ利用者は、d4PDF の過去と将来シミュレーション出力から、気候の平均状態や豪雨や台風などの顕著現象の特性についての統計的に有意な将来変化を、統計的仮定を導入することなく、簡単な算術計算により求めることができる。本データベースは、温暖化に起因する気候変化を調査する目的にも有用である。気候変化の影響評価研究では、自然災害、水文、都市計画、農業、健康、保険に係る様々な分野でのデータ利用が進められている。気候変動研究や気候変化リスク評価研究を進めたり、地球温暖化適応策を検討したりする上で、本データベースはいまや不可欠なものとなっている。さらに、日本では、d4PDF の普及とともに、地球温暖化研究に係る学際的研究コミュニティが形成された。



過去（水色）、非温暖化過去（青）、1.5K（緑）、2K（オレンジ）、4K（赤）昇温気候シミュレーションと 6つの気候モデル平均の CMIP5歴史実験（黒）の全球平均地表面気温偏差の時系列。灰色で示したレンジは各実験アンサンブルの 95% 信頼区間を示す。気温偏差は、各シミュレーション実験の 1975年～2005年の平均からの差で定義した。

日本語原稿執筆者：石井 正好（気象研究所）（敬称略）

論文出版日：2020/10/7

<https://doi.org/10.1186/s40645-020-00367-7>

Review

Atmospheric and hydroospheric sciences

## 非静力学領域の大気大循環モデルの力学：全球非静力学大気モデル比較実験

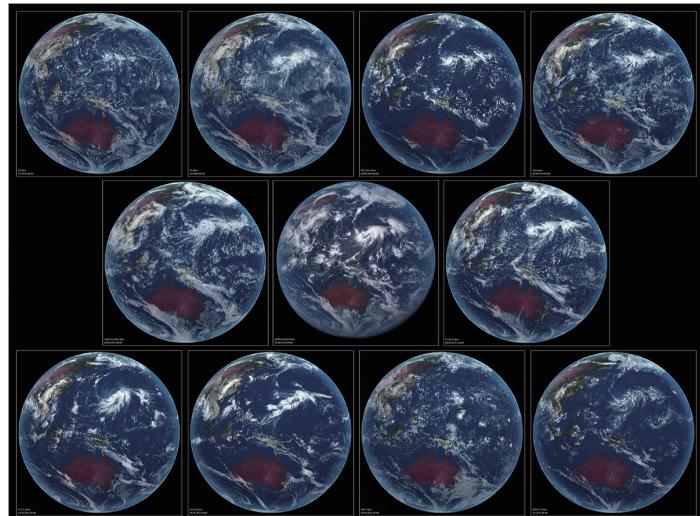
Stevens B, 佐藤 正樹, Auger L, Biercamp J, Bretherton CS, Chen X, Duben P, Judt F, Khairoutdinov M, Klocke D, 小玉知央, Kornblueh L, Lin SJ, Neumann P, Putman WM, Rober N, 濵谷 亮輔, Vanniere B, Vidale PL, Wedi N, Zhou L

### DYAMOND: The DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains

Stevens B, Satoh M, Auger L, Biercamp J, Bretherton CS, Chen X, Duben P, Judt F, Khairoutdinov M, Klocke D, Kodama C, Kornblueh L, Lin SJ, Neumann P, Putman WM, Rober N, Shibuya R, Vanniere B, Vidale PL, Wedi N, Zhou L

[Keywords] Climate modelling, Model intercomparison project, Tropical Convection

全球ストーム解像モデル（全球非静力学モデル）の最初の相互比較プロジェクトであるDYAMONDの実験プロトコルと研究目的に関するレビューを提示する。9つのモデルが40日間（2016年8月1日-9月10日）の相互比較期間のシミュレーション結果を提出した。これらのうち8つのモデルは、5km未満のメッシュ間隔で球面を覆う格子系を採用している。全球ストーム解像モデルでは熱帯の深い対流パラメリゼーションを用いずに、熱帯の積雲対流に伴うメソ循環の力学的な時間変化を計算することにより、気候システムのより自然に即した表現が可能である。また、人工衛星搭載センサーによる同程度の高解像度のデータと、より親和性のある比較が可能になる。各モデルと計算結果の基本的な特性をより詳細に説明するとともに、今後の研究のために、この計算結果の利用可能性の計画を示す。モデルアンサンブルの全球および東西平均したエネルギー収支、可降水量の分布、降水量を示し、熱帯低気圧の再現性と熱帯気象において重要な可降水量の予測可能性を評価する。



DYAMOND 参加モデルの雲画像のスナップショット。静止気象衛星ひまわり8号の視点から作成したモデル計算結果における2016年8月4日の雲分布を示す。画像は、各モデルの水物質の分布に基づいて色付けしたものである、モデルによって解像される対流構造と、実際の観測とを区別するのが難しいことを示す。画像は左から順に、上段：IFS-4km, IFS-9km, NICAM, SAM, 中段：Arpege, ひまわり8号, ICON; 下段：FV3, GEOS5, UKMO, MPAS。

日本語原稿執筆者：佐藤 正樹（東京大学 大気海洋研究所）（敬称略）

論文出版日：2019/9/30

<https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>



## Review

## Atmospheric and hydroospheric sciences

## 全球非静力学大気モデルによる雲プロセスに関する気候感度の不確実性の低減

佐藤 正樹, 野田 晓, 清木 達也, Chen Ying-Wen, 小玉 知央, 山田 洋平, 久芳 奈遠美, 佐藤 陽祐

## Toward reduction of the uncertainties in climate sensitivity due to cloud processes using a global non-hydrostatic atmospheric model

Satoh M, Noda AT, Seiki T, Chen Y, Kodama C, Yamada Y, Kuba N, Sato Y

**[Keywords]** NICAM, cloud microphysics scheme, cloud changes, cloud feedback, global non-hydrostatic model, global warming

従来の気候モデルでは、雲の表現の不確定性により、気候感度の推定に大きな不確実性がある。気候感度の不確実性の低減のために、高解像度の全球非静力学モデルを利用するアプローチが有望である。このようなモデルはメソスケールの対流システムを直接シミュレートすることによって雲の構造を再現することが可能で、その結果を人工衛星観測とよく対比できる。本論文では、全球非静力学モデルを用いた雲プロセスに関する気候感度の不確実性を低減することを目的とした5年間の研究プロジェクトの成果をレビューする。このプロジェクトは、気候変動リスク情報創生プログラム（SOUSEI）のサブグループとして実施されたもので、気候変化に関連する雲プロセスを研究するために非静力学正二十面体格子大気モデル（NICAM）を利用した。NICAMは、従来の全球気候モデル（GCM）よりもはるかに高い分解能（約7kmまたは14km メッシュ）で数値シミュレーションを行し、気候予測の不確実性の要因である対流パラメタリゼーションを用いず、雲微物理スキームにより雲を精緻に表現することができる。

本研究プロジェクトには、以下の3つの研究目標が設定された：1) タイムスライスの手法によって得られたNICAMによる地球温暖化シミュレーションにおける雲の変化の解析、2) 雲微物理スキームの改良・開発とそれに対する結果の感度の解析、3) 地球温暖化による台風等の大気擾乱に伴う循環の変化の解析。この研究プロジェクトではまた、ダブルモーメントバルク法の雲微物理スキームをNICAMに実装し、人工衛星観測を用いてそれによるシミュレーション結果を評価するとともに、本スキームの特性をビン型雲微物理スキームと比較した。NICAMによる将来予測シミュレーションでは、他のGCMの結果とは異なり、一般に高い雲の雲量が増加することが示された。また、NICAMによる高解像度シミュレーションにより、雲の水平サイズ分布の変化や熱帯低気圧・温帯低気圧の構造の変化について議論することができた。本レビューの最後には、TOUGOUと呼ばれるSOUSEI後継プログラムにおけるNICAMを用いた地球温暖化研究の将来の展望についても解説する。

日本語原稿執筆者：佐藤 正樹（東京大学 大気海洋研究所）（敬称略）

論文出版日：2018/10/29

<https://doi.org/10.1186/s40645-018-0226-1>

## 地球の気候を支配する海大陸の海岸線

山中 大学, 萩野 慎也, 伍 培明, 濱田 純一, 森 修一, 松本 淳, Syamsudin F

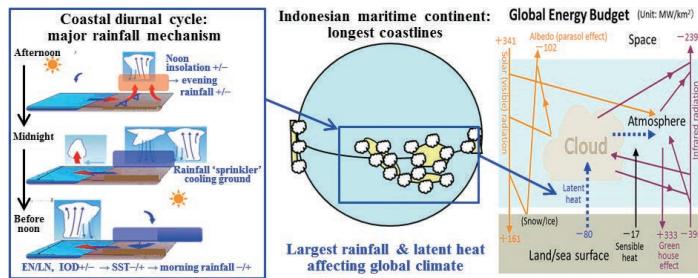
### Maritime continent coastlines controlling Earth's climate

Yamanaka MD, Ogino SY, Wu PM, Hamada JI, Mori S, Matsumoto J, Syamsudin F

**[Keywords]** Indonesian maritime continent, Atmosphere–ocean–land interaction, Convective clouds, Multiple scales, Diurnal cycle, Sea–land breeze circulation

モンスーンアジア水文気候研究計画(MAHASRI; 2006–16)期間に、インドネシア「海大陸」を対象としてレーダー網(HARI-MAU; 2005–10)および気候研究機関の雛形(MCCOE; 2009–14)を構築する2つのプロジェクトを実施した。本稿では、これらのプロジェクトで得られた、世界最多雨域の「海大陸」に関する気候学的研究成果を総括する。「海大陸」の大気変動で基本となるものは、海陸間温度差を原因として海岸線に沿って生じる日周期変動である。すなわち昼頃までの晴天時に入射した太陽放射により午後に陸上が海上より高温となり、その結果(中緯度の晴天夜間赤外放射とは異なり)、対流雲から降る夕立の‘打ち水’効果により陸が冷やされ、そのため日出前に相対的に高温となった海上で対流雲と朝雨が生じる。従って、中緯度とは異なり、「海大陸」の日周期変動は雨季の悪天日において、より顕著である。1日より長い周期、すなわち季節内、半年、1年あるいはそれ以上の周期の変動は、日周期変動の振幅の増減として現れる。例えば、ジャワやバリで低緯度にも拘らず南半球夏季に顕著な雨季があるのは、太陽高度が最高となる季節に、午前の晴れ間の日射加熱とそれが生む午後の海風水蒸気輸送が最も強くなるからである。またエルニーニョ期の「海大陸」では、平年に比べて海水温が低く、海上の対流雲と朝雨が普段より弱いことが効いて、少雨傾向となる。低気圧が殆ど生じない赤道周辺においては、日周期変動が殆ど唯一の組織的に雨を降らせるメカニズムであるため、年雨量は海岸線から離れると急激(100~300kmで1/3程度)に減少し、領域全体では海岸線密度(水平分解能100kmで測った海岸線の長さを陸地面積で割ったもの)が大きいほど多雨となる傾向をもつ。このため「海大陸」は、面積は地球全体の4%ほどに過ぎないが、雨量や潜熱加熱は全球平均の2倍ほどにも及ぶ。本来局地的な日周期変動は「海大陸」全域にわたり海陸間でほとんど同期して現れ、そのようにして一体化した「海大陸」の対流が、全地球的な気候に影響を与える。従って、「海大陸」域内の局地的対流活動を識別できる高分解能(<<100km; <<1日)な観測とモデルが、域内の防災のみならず、全地球的な気候予測の改善にも必須なのである。

日本語原稿執筆者：山中 大学（海洋研究開発機構 大気海洋相互作用研究分野）（敬称略）



「海大陸」海岸線周辺の日周期降雨・潜熱解放による全地球的気候支配



Review

Atmospheric and hydrospheric sciences

## 中間圏および下部熱圏の力学：レビュー

Vincent R A

### The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere: a brief review

Vincent R A

**[Keywords]** Atmospheric tides, Gravity waves, Planetary waves, Middle atmosphere, Mesosphere, Lower thermosphere, Wave coupling

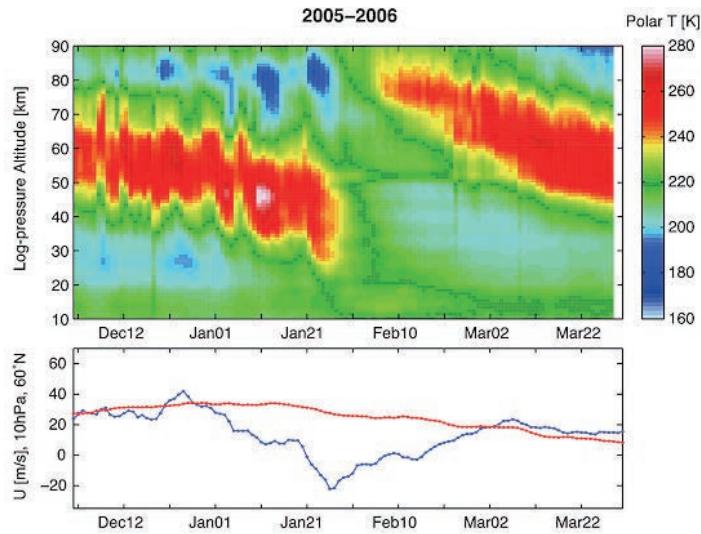
中間圏－下部熱圏（MLT）（高度60–110 km）の力学は波とその効果によって支配されている。MLTの基本的な構造は小規模重力波による運動量の蓄積によって支配されており、これによって中間圏界面における夏極から冬極への循環が駆動されている。大気潮汐もまたMLTの力学に重要な要素である。広範囲に展開した地点観測網、人工衛星、数値モーデリングはいずれも、MLT内の太陽非同期の潮汐モードは、熱圏・電離圏との直接的な結合を引き起こし、以前にも増して重要であることを指摘している。冬期の突然昇温等のより下層の大気中の主要な擾乱は、MLTの循環パターンや熱的構造に急激な変化をもたらす。赤道中間圏においては、準2年の時間スケールの変動もみられるが、主に重力波収束によって駆動される半年スケールの東西風の振動が卓越している。準2日波のような惑星規模の波動は、特に南半球において夏季MLTの力学の一時的な支配要因となり、高緯度MLTの熱的構造と物理特性の急激な変化をもたらす効果があるだろう。本論文では、MLTの力学に関して、特に過去10年間の研究の進展に着目した簡単なレビューを行う。

日本語原稿執筆者：河谷 芳雄（海洋研究開発機構）

佐藤 正樹（東京大学 大気海洋研究所/

PEPS 編集委員会 セクション編集長）

（敬称略）



**2006年の突然昇温。**上図：2006年1月下旬の成層圏突然昇温期間中の温度の時間高度断面。成層圏界面が時間とともに下降し、昇温のピーク時に消滅、それに引き続いて中間圏に界面が再出現し、下降していくことに注目。下図：北緯60度、10hPaにおける東西平均東西風の時間変動。青線は突然昇温期間中の風速、赤線は気候学的な季節変化。Yamazaki et al. (2012) の図1に基づく。

成層圏の昇温は大規模な惑星波が冬季の中層大気（高度10-100km）で碎波することで生じる。この図は中層大気全体が影響を受けていることを示しており、東西風と温度の構造が一時的に夏季条件のように逆転する。成層圏の東西風は短時間で西向き（負値）に変わり（下図の青線）、高度70km以上の中間圏では東向きに変わる。卓越風のこのような変化は、統して重力波の鉛直伝播に影響を与え、重力波が中層大気に及ぼす効果を変える。成層圏の昇温の効果は電離圏でも観測されており、電波の伝播に影響を及ぼしている。

なお、論文中の Figure 1. のキャプション中の Hagan et al. ([1999]) は Hagan et al. ([2009]) の誤りである。



Review

Atmospheric and hydrographic sciences

## IPCC AR5における地球システムモデリングとこれから

羽島 知洋, 河宮 未知生, 渡辺 路生, 加藤 悅史, 立入 郁, 杉山 昌弘, 渡辺 真吾, 岡島 秀樹, 伊藤 彰記

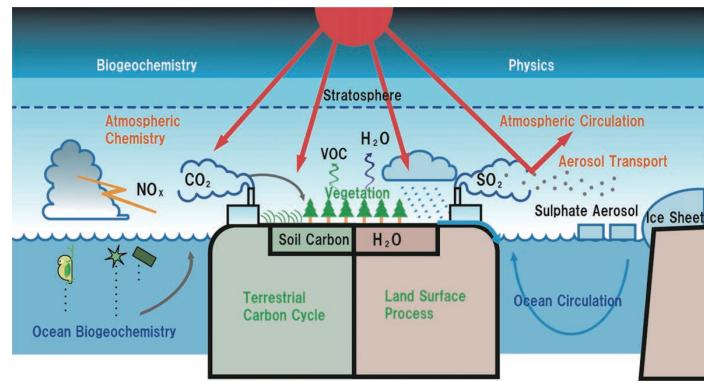
### Modeling in Earth system science up to and beyond IPCC AR5

Hajima T, Kawamiya M, Watanabe M, Kato E, Tachiiri K, Sugiyama M, Watanabe S, Okajima H, Ito A

**[Keywords]** Earth system science, Earth system model, Carbon and nitrogen cycle, Land and ocean CO<sub>2</sub> uptake, Ocean acidification, Land-use and land-cover change, EMICs, Geoengineering, Iron deposition

人為CO<sub>2</sub>排出に代表される人間活動は地球環境を変化させてきており、現在は、その変化がより顕在化しつつある状況にある。地球環境を構成する多くの要素は相互に作用しており、個別要素に切り離して議論するだけでは不十分であるため、この問題を解決するためには研究分野間の垣根を越えた科学的協力が欠かせない。地球システムに対する理解を深化させ、現在進行中の地球環境問題を解決するためには、このような認識を持って取り組む必要がある。これらの一端は、地球システムモデルという数値計算

モデルとして既に具現化されており、実際に地球環境変動予測に用いられている。本論文ではまず、地球システム科学におけるモデリングの発展について述べる。次に、気候変動に関する政府間パネルの最新報告書の中から、特にこれら数値計算モデルによって得られた知見に焦点を当てて紹介するとともに、次期報告書に向けて議論が進められている以下の7つの研究課題：1) 炭素循環や温室効果ガスと関連する「全球窒素循環」、2) CO<sub>2</sub>吸収に伴って生じる「海洋酸性化」、3) 主要な人為CO<sub>2</sub>排出源の一つである「土地利用変化」、4) より長期／多数のアンサンブル数値実験を行う上で欠かすことの出来ない「簡略化された地球システムモデル」、5) 気候緩和の手段として期待される「気候工学」、6) 長期地球環境予測において重要な「海洋によるCO<sub>2</sub>吸収」、7) 海洋CO<sub>2</sub>吸収速度に影響を与える「海洋生態系への鉄供給」に関するレビューを行う。地球環境変化に関する科学的知見の集積と具体的対応は、地球科学において喫緊の課題である。モデリングという手法は、地球システムを構成する要素間の相互作用を明示的に取り扱うことが可能であり、多様化する研究分野の橋渡しをすることにより、今後の地球システム科学の発展に強く貢献する。



地球システムモデルの概念図

日本語原稿執筆者：河宮 未知生（海洋研究開発機構）（敬称略）



論文出版日：2014/12/18

<https://doi.org/10.1186/s40645-014-0029-y>

## ヒ素の循環と汚染

益田 晴恵

### Arsenic cycling in the Earth's crust and hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities

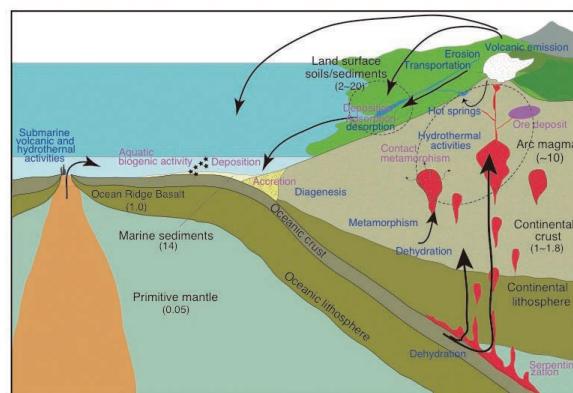
Masuda H

[Keywords] Arsenic contamination, geologic cycle, plate tectonics, reduction, oxidation

1970年代末に地下水中ヒ素による慢性中毒の以降ヒ素含有地下水の摂取による健康被害がインド・西ベンガル州で最初に報告された後、汚染地域と被害者は世界的に増大し続けている。ヒ素汚染地下水の原因は多くの場合自然由来であるが、人間の社会活動が汚染の拡大に関わっていると考えられる。本報告では、世界各地のヒ素汚染地域のケーススタディを整理し、地圏と水圏でのヒ素の挙動と汚染が発生するメカニズムについて概説した。

ヒ素は微量（～ ppm 程度）ではあるが地圏に広く分布する元素である。一方、ヒ素汚染は弧状火山帯、激しい隆起・浸食・堆積作用が起こる造山帯とそれらの周辺地域に集中する傾向がある。このことは、ヒ素がプレートテクトニクスと深く関連して移動すること、また、活動的なテクトニクス場でヒ素が水圏へ移動しやすい環境となることを示唆している（図）。ヒ素は親銅元素であるが、地圏では流体とともに移動しやすい。したがって、火成活動に伴うマグマ性流体や熱水、それらに起源を持つ硫化物鉱化体が一次的なヒ素原因物質となる。また、地下水ヒ素汚染は、低濃度であっても、水と反応しやすい状態でヒ素が分布することで発生する。細粒のヒ素含有鉱物を含む碎屑物や風成塵（特に火山灰）などが散在する新生代堆積物中に発達する地下水帯水層ではヒ素汚染地下水が広範囲に出現する。このような新生代堆積物層は、ヒマラヤ・チベットの周辺地域や風成層が発達する乾燥－半乾燥地域の平野部で特徴的に見られる。これらのヒ素汚染地下水の形成には、表層水の流路や地下水帯水層中で起こる化学的風化作用や生物化学的作用が深く関与している。

Masuda, Figure 4



ヒ素の地球化学的循環過程

カッコ内の数値はそれぞれの地質体中のヒ素濃度。青字と紫字はヒ素の流出過程と固定過程となる地質現象を示す。

日本語原稿執筆者：益田 晴恵（大阪市立大学大学院理学研究科）（敬称略）

論文出版日：2018/11/1

<https://doi.org/10.1186/s40645-018-0224-3>



## Review

## Biogeosciences

## 地球温暖化と海洋酸性化への海洋の石灰化生物の応答に関する展望 —高二酸化炭素濃度下での「温暖地球」におけるサンゴと有孔虫の挙動—

川幡 穂高, 藤田 和彦, 井口 亮, 井上 麻夕里, 岩崎 晋弥, 黒柳 あずみ, 前田 歩, 守屋 和佳, 真中 卓也, 高木 悠花, 豊福 高志, 吉村 寿紘, 鈴木 淳

### Perspective on the response of marine calcifiers to global warming and ocean acidification – Behavior of corals and foraminifera in a high CO<sub>2</sub> world “hot house”

Kawahata H, Fujita K, Iguchi A, Inoue M, Iwasaki S, Kuroyamagi A, Maeda A, Manaka T, Moriya K, Takagi H, Toyofuku T, Yoshimura T, Suzuki A

**[Keywords]** Partial pressure of CO<sub>2</sub>, Global warming, Ocean acidification, Coral, Foraminifera, Bleaching, Calcite, Aragonite, Saturation state, Organic matter, Alkalinity, Carbon cycle

大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度は現在400ppmを超え, IPCC のシナリオ RCP 6.0 (中程度) によると今世紀末には720-1000ppmまで上昇し、「双子の悪魔」と呼ばれる「地球温暖化」(気温は約2.6°C上昇) と「海洋酸性化」(pHも約0.3下降) が進行し、石灰化生物に大きな脅威となると予想されている。低緯度に生息する造礁サンゴや有孔虫は光合成共生をしているものが多く、これは温暖で貧栄養の海洋を生きぬく生態系に適したものと考えられる。造礁サンゴを中心とした共生藻を有する石灰化生物では、高温と高光量の条件下での「白化」が世界的規模で重大問題となっている。CO<sub>2</sub>が海水に溶存すると、海水中の CO<sub>2</sub>の分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) と溶存無機炭素は増加し、pHと炭酸塩鉱物の飽和度は減少するが、全アルカリ度は変化しない。海洋生物の石灰化速度は酸性化した海水では概して減少する。しかしながら、*Calcarina gaudichaudii* というサンゴ礁に生息する大型底生有孔虫では、通常と反対に高  $p\text{CO}_2$  条件下で石灰化速度が増大した。このように、環境、種、生活史のステージにより異なる応答が観察されることがある。近年、カルシウムや酸素・炭素などの同位体比や生物体内の pH の可視化などの研究を通じて石灰化機構の解明が進んでいる。大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は >1,000ppm だった白亜紀でも大量の炭酸塩が沈積した。これは、陸域の風化により、全アルカリ度が増加し、炭酸塩の保存が改善されたためである。但し、この中和反応のスピードは大変遅い。一方、暁新世・始新世境界 (5500万年前) では、メタンハイドレートの崩壊、メタンの酸化による CO<sub>2</sub> の供給により、現代のような深刻な海洋酸性化がもたらされ、底生有孔虫の半分が絶滅した。CO<sub>2</sub> は極域や高緯度域の冷たい海水では溶解しやすく、深海では圧力効果により炭酸塩はより溶けやすい。このため、海洋酸性化は深層においても深刻な影響が懸念される。将来の研究課題として、炭酸塩の安定性について過去の全アルカリ度の定量的な復元に関する研究や、地球温暖化や海洋酸性化への生物の応答に関し、分子生物学的な分野からのアプローチなどなどが挙げられる。

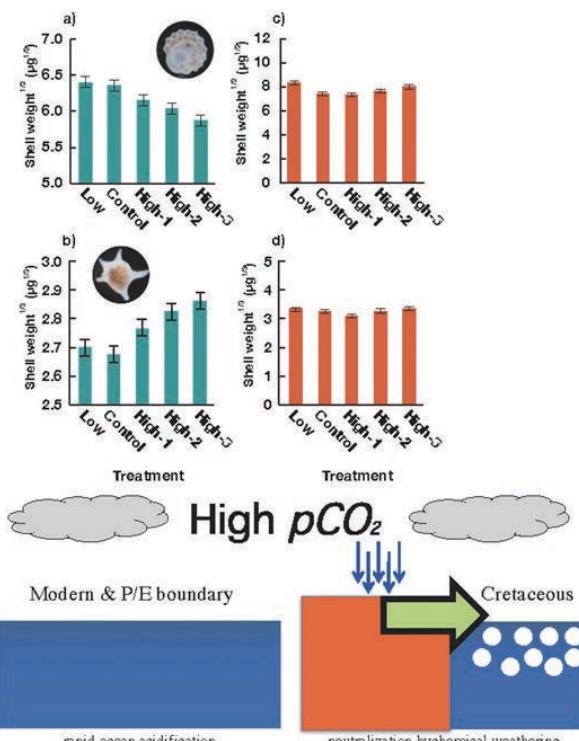


Fig. 1. 海洋酸性化への呼応を調べるための底棲有孔虫を用いた精密飼育実験。

Fig. 2. 地球表層システムにおける海洋酸性化と中和機能の模式図。

Fig. 2 illustrates the Earth's surface system's response to ocean acidification and its neutralization mechanism. It shows a diagram where high  $p\text{CO}_2$  levels (indicated by clouds) lead to rapid ocean acidification (blue arrow pointing down). This is contrasted with the Cretaceous period (orange square), where chemical weathering (green arrow) led to neutralization by chemical weathering (blue arrow pointing up), resulting in a modern and pre-industrial boundary (Modern & P/E boundary).

日本語原稿執筆者：川幡 穂高（東京大学 大気海洋研究所 海洋底科学部門）（敬称略）

論文出版日：2019/1/17

<https://doi.org/10.1186/s40645-018-0239-9>



## 海底熱水の物理・化学的多様性が熱水生態系に及ぼす影響についての理論的考察

中村 謙太郎, 高井 研

## Theoretical constraints of physical and chemical properties of hydrothermal fluids on variations in chemolithotrophic microbial communities in seafloor hydrothermal systems.

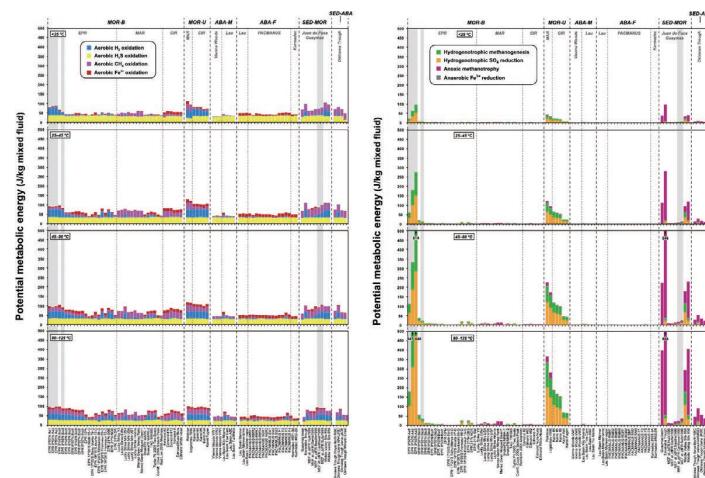
Nakamura K. Takai K.

**[Keywords]** Deep-sea hydrothermal systems, Chemosynthetic ecosystems, Hydrothermal fluid chemistry, Host rock geochemistry, Geochemical modeling, Bioavailable energy yield

海底熱水生態系は、熱水に含まれる還元物質から化学エネルギーを取り出すことのできる微生物（化学合成微生物）を一次生産者とする特異な生態系である。このような生態系は、地球における初期生命の発生・進化や地球外生命を探求するための重要な手掛かりとして注目されている。熱水から供給される還元化学物質をエネルギー源として一次生産を支える生態系が、熱水の化学組成に大きな影響を受けているであろうことは容易に想像することができる。しかし、その化学的なリンクを包括的に理解することは容易ではなく、これまでその全体像は得られていなかった。そもそも、熱水の化学組成（特に生命が代謝で使う硫黄、水素、メタン、鉄）のバリエーションと、それを生み出す地質学的な背景は、これまで必ずしも系統立てて理解されてはおらず、さらにその生命活動に与える影響までをも包括した研究は、ほとんど行われてこなかった。そこで、本研究ではまず熱水化学組成のコンパイルを行い、代表的なテクニクセッティングを網羅した89の熱水端成分のデータベースを構築し、それを用いて（1）熱水の化学組成のバリエーションとそれを生み出す地質学的な背景を考察するとともに、（2）熱水-海水混合域において生物が利用可能な代謝エネルギーのポテンシャルを計算した。さらに、（3）その結果を実際に観測されている生態系の特徴と比較し、熱水化学組成と熱水生態系との化学的な繋がりを考察した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. ほとんど全ての熱水系において、硫黄の濃度は1mmol/L以上と高く、またバリエーションも小さい。このことを反映して、ほとんどの熱水系において硫黄酸化反応は最もエネルギー的に有利な代謝であり、熱水化学組成のバリエーションはこの傾向にほとんど影響を与えない。
2. 一方、熱水の水素とメタンの組成は異なる地質セッティングに起因する熱水系によって様々であり、そのバリエーションも非常に大きい。これらの元素の濃度バリエーションは、生物が利用できる代謝エネルギーに大きな影響を与えるため、生態系へのインパクトが大きい。
3. 実際に観測される熱水生態系の生物は、熱水の化学組成から理論的に予測される傾向と概ね整合的であることがわかった。これにより、熱水生態系と熱水化学組成の関係性を化学的に系統立てて説明できることが示された。このことは、今後の地球初期生命研究および地球外生命研究を進める上で、重要な理論的基盤を与えると期待される。

日本語原稿執筆者：中村 謙太郎（東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻）（敬称略）



様々な地質セッティングの熱水から、代表的な好気的（上図左）・嫌気的（上図右）代謝によって得られるエネルギー量

論文出版日：2014/4/22

<https://doi.org/10.1186/2197-4284-1-5>



## 環境研究および生態学研究において炭素・窒素同位体比を利用するための生化学的・生理学的基礎

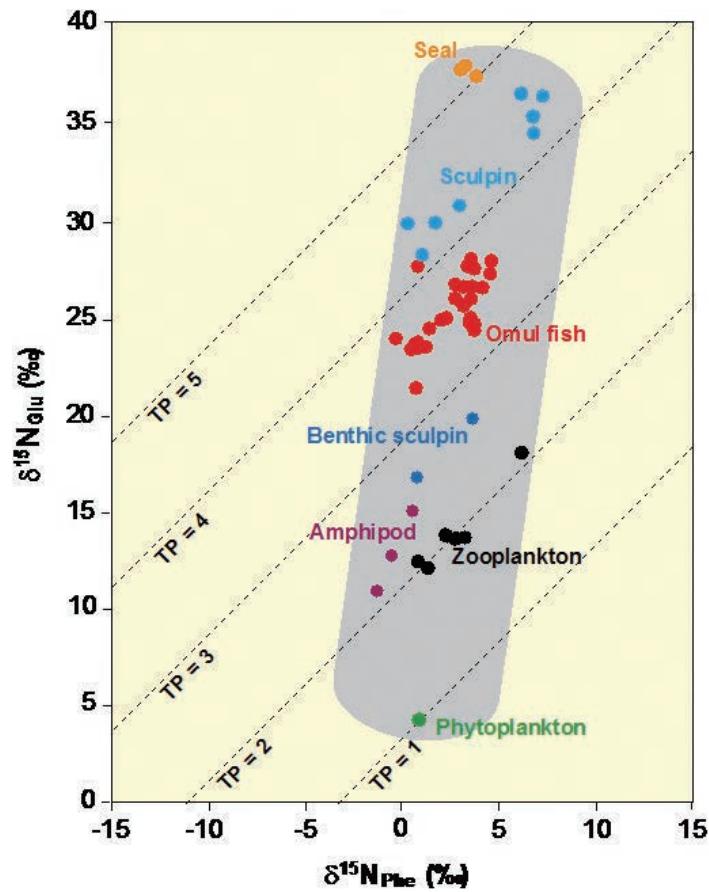
大河内 直彦, 小川 奈々子, 力石 嘉人, 田中 洋之, 和田 英太郎

## Biochemical and physiological bases for the use of carbon and nitrogen isotopes in environmental and ecological studies

Ohkouchi N, Ogawa N O, Chikaraishi Y, Tanaka H, Wada E

**[Keywords]** Carbon isotopic composition, Nitrogen isotopic composition, Ecosystem, Food web, Chlorophyll, Trophic position, Amino acid, Animal organ

炭素および窒素安定同位体比は、地球環境や生態系を記述する指標として広く利用されてきた。特に生態学的な研究においては、食物網解析の重要なツールとして同位体生態学と呼ばれる分野を生み出してきた。地球表層環境は、その重要なコンポーネントである生物活動による束縛のもと、強い負のフィードバックのかかったシステムとなっている。その結果、地球表層環境において中心的な役割を果たしている炭素と窒素は、その同位体組成も含めてシステム内できわめて微妙なバランスを保っている。したがって、環境や生態中における炭素・窒素同位体比の分布を深く理解するためには、生物が触媒するプロセス、つまり生化学的あるいは生理学的な側面について立ち入らねばならない。とはいえ、生物の細胞内で起きる生化学反応や生理学的な反応は、地球環境を研究する多くの研究者にとって必ずしもなじみの深いものではない。そこで本論文では、環境—独立栄養生物間、生物—生物間の相互作用を担う細胞内の代謝に焦点を当て、その基礎的な知見をまとめた。特にアミノ酸の脱炭酸および脱アミノ基について述べた。また、同位体比を環境科学や生態学に応用する場合、生物レベルで捉えるより、化合物レベルで捉えた方が役に立つことがある。たとえば、天然環境中に広く分布するクロロフィルは、光合成独立栄養生物のみによって合成される化合物である。それゆえクロロフィルの窒素同位体比は、環境試料中から物理的に分離不可能な微生物やデトリタスなど他の生物の影響を排除し、一次生産者の窒素同位体比情報のシグナル／ノイズ比を上げることに役立つ。また、これまでバルク窒素同位体比によって推定されることの多かった生物の捕食—被食関係は、アミノ酸レベルの窒素同位体比を用いることによってさらに高い精度で推定することができる。本論文では応用例も示しながら、それらの有用性について論じる。



アミノ酸（グルタミン酸とフェニルアラニン）の窒素同位体比から推定される、バイカル湖の生物の栄養段階。TP=Trophic Position (栄養段階)

日本語原稿執筆者：大河内 直彦（海洋研究開発機構 生物地球化学研究分野）（敬称略）



## 地球型惑星の強度モデルに基づいたリソスフェアの構造と進化の考察

片山 郁夫

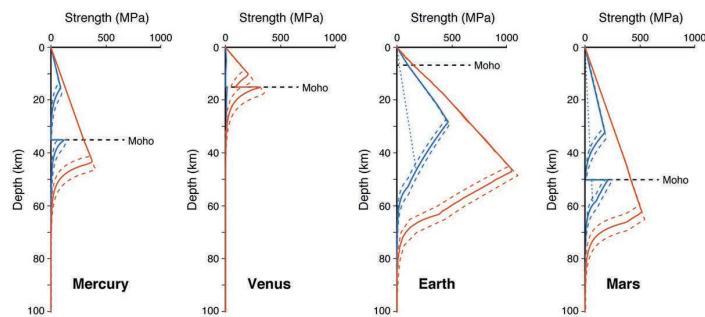
### Strength models of the terrestrial planets and implications for their lithospheric structure and evolution

Ikuo Katayama

[Keywords] Rheological structure, Lithosphere, Elastic thickness, Terrestrial planets

地球型惑星の内部構造やダイナミクスは、リソスフェアの力学的強度と密接に関わっている。とくに岩石中の水の存在は、レオロジー的な性質に強い影響を及ぼすことが、近年の実験的研究から報告されている。本レビュー論文では、最新のレオロジー構成則に基づいて地球型惑星の強度モデルを計算し、観測結果と照合することで惑星内部の構造、とくに水の存在について考察した。

いずれの地球型惑星においても、水の存在によって岩石強度は低下し、とくに粘土鉱物の存在は脆性強度を著しく低下させる特徴をもつ。レオロジーモデルに基づいてリソスフェアの弾性的厚さを計算したところ、水の存在下では弾性的厚さが著しく薄くなる特徴を示す。一方、脆性塑性境界の深さは、ウェットモデルでは浅部へシフトするのに対し、粘土鉱物の存在下ではドライな条件とほぼ同程度になる傾向を示した。また、塑性強度は物質によっても異なるため、地殻マントル境界での変形が塑性変形に支配される場合、レオロジーモデルは地殻の厚さや構成物質にも影響を受ける。このように、弾性的厚さや脆性塑性境界が水の存在や物質に対し異なるセンシティビティをもつため、重力異常や表層地形の変形構造から弾性的厚さや脆性塑性境界の深さが制約できれば、惑星内部での水の存在などにアクセスすることが可能である。例えば、火星の初期地形からは非常に薄い弾性的厚さと深い脆性塑性境界が報告されており、火星内部での水の存在を示唆しているのかもしれない。今後、惑星内部での物理探査が進むことで、リソスフェアのレオロジー的な性質と組み合わせて、地球型惑星内部での水の存在や進化の理解が進むことが期待される。



地球型惑星の強度モデル。赤はドライ条件、青はウェット条件での計算結果を示す。

日本語原稿執筆者：片山 郁夫（広島大学 地球惑星システム学）（敬称略）



## マントル深部での融解、全地球規模での水の循環と海水量の安定性への影響

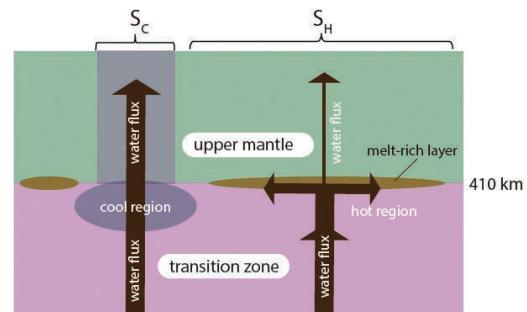
唐戸 俊一郎, Bijaya Karki, Jeffrey Park

### Deep mantle melting, global water circulation and its implications for the stability of the ocean mass

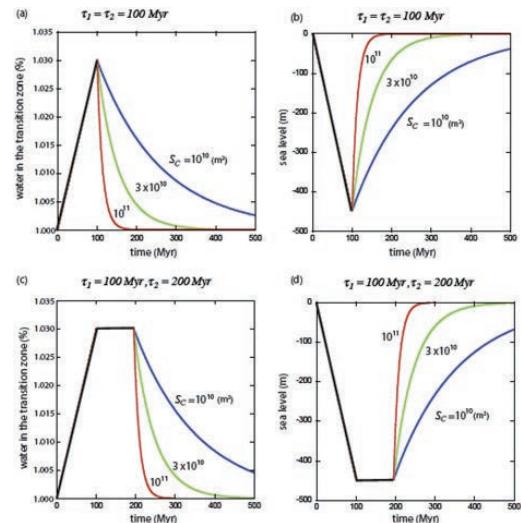
Shun-ichiro Karato, Bijaya Karki, Jeffrey Park

**[Keywords]** habitability, ocean mass, sea-level variations, mantle transition zone, water in the mantle, deep mantle melting, water valve

地球の海水の量はマントルからの脱ガスとマントルへの水の逆入との動的平衡によって決められている。本論文ではまず鉱物物理学、地球物理学と地球化学という広い研究分野での全地球規模での水の循環に関する研究結果をまとめ、この動的平衡についてのモデルを提出する。マントル遷移層には他の領域に比べ、地域差は大きいものの多量の(0.1-1%)水がある。マントル遷移層の水の豊富な領域が上部マントルや下部マントルに運ばれると部分融解が起こる。融解によってできたメルトには大量の水が入る。この水に富んだメルトは周囲の鉱物との密度差に応じて、上かまたは下に移動する。マントル遷移層ではマントル物質が相転移する。相転移は固体の鉱物ではある狭い深さの範囲で起こるが、同様な構造変化はメルトでは幅広い圧力でもっと緩やかに起こる。そのため、マントル遷移層の直上ではメルトはほとんどの場合、共存する鉱物より密度が大きいが、直下では密度が小さい。この結果として、水は融解による輸送によりマントル遷移層に集まる。しかし、マントル遷移層の水の量は際限なく増加するわけではない。マントル遷移層の直上(410km)でできるメルトの密度は水の量によって変化する。メルト中の水の量は融解の起きる温度に依存する。マントル遷移層の低温領域では多量の水が無い限り融解は起こらず、融解ができるメルトには多量の水があり、軽いメルトができる。そこで、もしマントル遷移層の多量の水のある領域が、マントル遷移層の低温領域に移動してくれれば軽いメルトができ、水が遷移層から取り除かれる。その結果、マントル遷移層の低温領域はマントル遷移層の水の量の上限を決める水バルブとして機能し、マントル遷移層の水の量を自動制御する。地球全体の水の大部分は海水とマントル遷移層に存在するのでマントル遷移層の水の量が自動制御されておれば、海水量も自動制御され安定になっているはずである。海水量を反映する海水準変化の歴史を見ると時間とともに大きく変動しているが、発散することなく一定の値に落ち着いていることがみえる。我々のモデルはこの観測結果をうまく説明する。地球上に長い間、海水が安定に存在するのはマントル遷移層での水バルブの効果によるものかもしれない。



410-km境界での水の輸送を示す模式図。低温部では多量の水が上部マントルに輸送されるが、高温部では少量の水しか輸送されない。 $S_C$ : 低温部の面積(=△ $S$ )  $S_H$ : 高温部の面積



海水量の変動のモデル計算結果

$\tau_1$ : 再ガスの時間スケール,  $\tau_2$ : 脱ガスの時間スケール,  $S_C$ : 低温部の面積

日本語原稿執筆者：唐戸 俊一郎（イエール大学）（敬称略）

論文出版日：2020/12/10

<https://doi.org/10.1186/s40645-020-00379-3>



## 核—マントル結合系の進化：レビューと将来展望について

中川 貴司

## A coupled core-mantle evolution: Review and future prospects

Nakagawa T.

[Keywords] Geomagnetic field, Earth's core, Deep mantle, Long-term evolution

本レビューでは、特に地磁気観測データならびに古地磁気データ解析による長期間磁気変動過程（地磁気永年変化）と、それによつて地球深部の諸現象（内核の生成・成長）を説明することを目的とした、核—マントル結合系による進化過程に関する研究の現状と将来展望について議論している。核—マントル結合系の進化過程にとって、最も本質的な物理量はマントル深部構造が色濃く反映された核—マントル間における熱流量であり、これまでの研究では、この物理量を用いて、過去40億年以上にわたる中心核が担っている磁気進化のシナリオを提唱してきた。しかしながら、核—マントル結合系の進化の結果として説明される諸現象の十分な説明（内核の年齢や地磁気極逆転周期）にはまだ程遠く、現在も様々な進化シナリオが様々な研究アプローチから提唱されている。さらに、最近の地震波解析からは、核—マントル境界直下の核側に低速度構造が発見されており、この構造が核—マントル結合系の進化過程の解明をさらに複雑にしている。

核—マントル結合系の進化過程の解明は、様々な困難がついてまわる。しかし、最近の様々な研究者の努力によって徐々に解明が進み、長期間磁気変動過程が地球深部の変動と深く関連していることが明らかになってきている。今後の展望として、以下の2点を指摘する。

1. 地球形成過程との関連を取り入れることで、進化過程の初期条件（マグマオーシャンの固化の影響やいつプレートテクトニクスが開始されたのか？）の影響を解明し、惑星形成論と固体地球物理学との融合させた研究の展開を行う必要がある。

2. 地球を取り巻く磁場は、我々生命体を太陽からの有害な放射線や大気の剥ぎ取りに対する盾の役割をしているため、地球深部過程と表層環境の長期間進化にはなんらかの関連性があると考えられる。その関連性を解明することで、地球が多圈相互作用系の結果として「生存可能な惑星」として位置付けられる理由の追求のきっかけを作るために、古環境変動—固体地球物理学の融合研究の発展が今後重要なポイントとなる。

日本語原稿執筆者：中川 貴司（香港大学／広島大学）（敬称略）



(a) 核—マントル結合系の概念図；(b) 核—マントル境界における温度構造と熱流量の関係性；(c) 核—マントル結合系のフィードバックの概略図；(c) パラメータ化マントル対流理論と核進化モデルを結合させた核—マントル結合系進化モデルの計算例（左上：マントル熱構造；右上：マントル熱収支；左下：内核サイズの進化；右下：核内対流による磁気双極子モーメントの強さ）。磁気双極子モーメントについては、核合金物質に関する2つの熱伝導率を考慮（163W/m/Kと125W/m/K）している。

## 繰り返し地震の検出と断層スロースリップ推定への応用

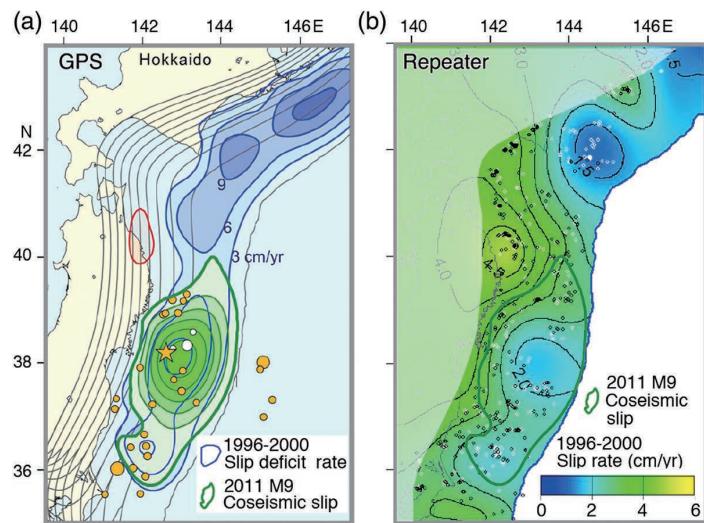
内田 直希

### Detection of repeating earthquakes and their application in characterizing slow fault slip

Uchida N

**[Keywords]** Repeating earthquake, Interplate slip, Fault creep, Aseismic slip

繰り返し地震は、クリープ（スロースリップ）が卓越する断層上に存在する地震性のパッチでの、周囲のクリープによる地震間の応力の蓄積と地震時の応力の解放によって生じる。この繰り返し地震と断層クリープの関係は、断層でのスロースリップの状況をモニタするために利用できる。つまり繰り返し地震は、断層に埋め込まれたクリープメータとして用いることができる。本レビューでは、このような目的での繰り返し地震の利用のために重要な同じパッチの破壊を確実に選び出す方法、および繰り返し地震によるスロースリップの推定の特徴について紹介する。繰り返し地震の選定には、地震波形の相似性あるいは震源位置の同一性が基準として用いられる。震源位置を基にした抽出では、すべり域の一致の確認のために、断層サイズに比べ震源位置の精度が十分高いことが必要である。一方、波形相似性を利用した抽出では、隣接した地震との区別のために、十分高い周波数範囲の波形を使用する必要がある。適切でない抽出基準は、誘発された地震など同じ場所の繰り返し地震でないものを含んでしまい、スロースリップの推定に大きな誤差を与える。適切な抽出基準の設定には、繰り返し地震の発生間隔や活動の継続期間も有力な情報となる。繰り返し地震は、測地学的な推定とは独立な断層クリープの推定を提供し、両者が利用できる場合、その結果は調和的な場合が多い。また、横ずれ断層における断層深部や沈み込み帯での海溝近傍など、測地学的数据によるすべり推定の解像度が限られることが多い領域で特に有効である。繰り返し地震によるスロースリップの推定は、測地学的な推定に対して、粘弾性的な変形や間隙弾性反発など、大規模な地震の場合顕著となる断層の外で起きる変形による影響を受けないという利点もある。一方、弱点としては、断層面上での不均一な分布や地震の規模からすべり量を推定するために必要なスケーリング則の精度が挙げられる。異なるスケーリング則間には推定されるすべり量に大きな差が存在する。断層におけるすべり過程では、地震による速いすべりだけでなく、スロースリップが重要な役割を担っており、繰り返し地震解析は、プレート間の定常すべり、余効すべり、自発的な周期的すべりなどの断層でのゆっくりとしたすべり現象の解明に大きく役立っている。



東北沖地震前のプレート境界固定状況の繰り返し地震（b）およびGPSデータ（a）による推定（Nomura et al. 2017に加筆修正）。

日本語原稿執筆者：内田 直希（東北大学 理学研究科）（敬称略）



## 緊急地震速報：“強震が到達するまでの数秒間”が意味することは？

田島 文子, 林田 拓己

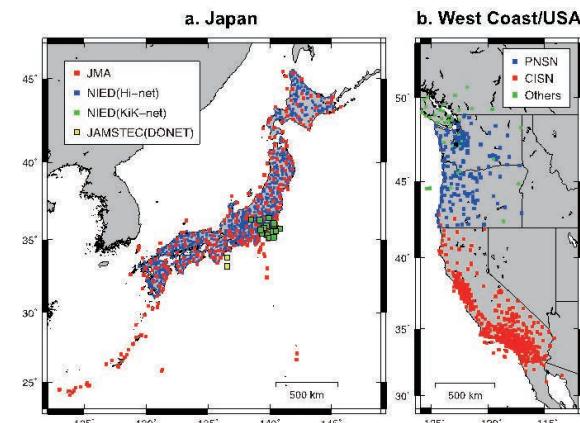
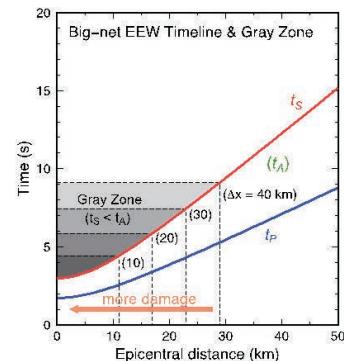
### Earthquake Early Warning: what does “seconds before a strong hit” mean?

Tajima F, Hayashida T.

**[Keywords]** Earthquake early warning, effective preparation for seismic safety at recipients' sites, short-wavelength ground motion variation

緊急地震速報（EEW）システムは、地震波をリアルタイムで観測することにより地震の発生を検知し、震源位置・マグニチュード・発生時刻などのパラメータを瞬時に決め、破壊的な地震波エネルギーが予想される場合には、該当する地域に地震動が到達する前に警報を出すことを意図したシステムである。現在、広域をカバーする EEW システムは数カ国で稼働しており、日本では、国中の地震活動を観測する世界最先端のシステムが2007年から稼働している。2011年にマグニチュード9の東北沖地震が発生した時は、広範囲に EEW を発信することができた。この地震による死者・行方不明者の数は、今世紀に多くの死傷者を出した地震 ( $M_w \geq 6.6$ ) の中では、地震の規模に比べかなり少ない。他の国々の多くは、死傷者が少なかったことの主な理由として、高度に整備された広域の EEW システムが稼働したことによるとみなし、日本をモデルにした EEW システムを設置することを計画している。しかしながら、日本の地震災害や災害軽減のための環境作りの歴史は他国とはかなり異なっている。加えて、広域の観測網（以降、ビッグ・ネットと呼ぶ）からのデータを使う EEW システムには、いろいろ限界がある。従って、日本モデルのシステムが他国で有効に機能するためには、多くの要素を考慮する必要がある。本論文では、EEW 開発につながる研究がどのように発展し、システムが現在どのように機能するかをレビューする。また、ビッグ・ネットの観測点間隔よりも短い波長で地震動が変化することも示す。しかしながらビッグ・ネットの観測点密度を上げてより細かいモデルを作ることに意味がある訳ではなく、どのような状況の地震動にも耐えうるように環境を整えることが、システムの活用になることを強調したい。緊急地震速報を受ける各サイトで備えを十分にすることは基本的に重要で、その重要さは観測点を増やし解析方法を多少改善しても変わらない。EEW に関わっている研究者やエンジニアは、システムがどのように機能し、災害軽減に役立てるにはどのような事前の備えが必要かの広報に努めることが望まれる。

日本語原稿執筆者：田島 文子  
(カリフォルニア大学アーバイン校 物理・天文学科) (敬称略)



(上図)

ビッグ・ネットの緊急地震速報のタイムラインと 強震動が警報の前に到達するグレイゾーン。縦軸は地震発生時刻からの経過時間、横軸は震央距離 (D)。グレイゾーンは、異なる観測点間隔 ( $\Delta x = 10, 20, 30, 40\text{km}$ ) の観測網毎に示されている。例えば、間隔が20kmの観測網の場合、グレイゾーンは震源から半径約17kmの地域で、そこでは警報の前に強震が到達し、ゾーンの外よりも強い揺れがより大きな被害をもたらす可能性がある。

(下図)

ビッグ・ネットの観測点分布の例：a. 日本における観測点間隔は国中でほぼ20km かそれ以下である。このシステムでのグレイゾーンは、震源から約17km である。；b. 米国・西海岸地方の観測点間隔は均質ではなく、ロサンゼルス、サンフランシスコ、シアトルのような人口密度の高い都市部では約10km、人口密度の低い地域ではそれよりもずっと大きい。



## Review

## Solid earth sciences

## カリフォルニアフランシスカンコンプレックスにおける海洋プレート層序の構造的形態と変化： メランジュの起源と沈み込み - 付加過程に関する知見

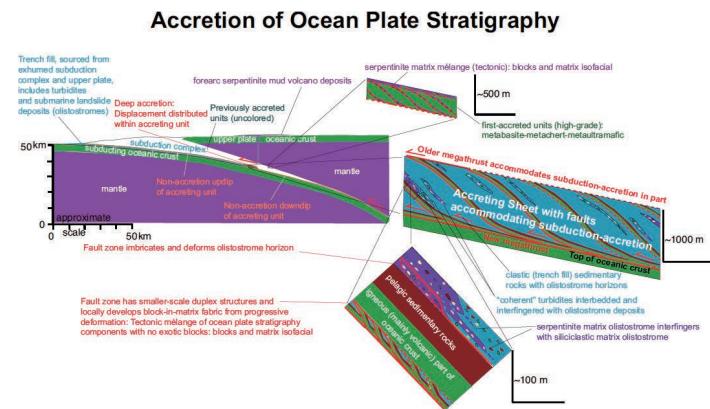
Wakabayashi J

### Structural context and variation of ocean plate stratigraphy, Franciscan Complex, California: insight into mélange origins and subduction-accretion processes

Wakabayashi J

**[Keywords]** Ocean plate stratigraphy, Subduction complex evolution, Subduction megathrust slip accommodation, tectonic and sedimentary mélanges

沈み込む海洋プレートから沈み込み一付加体への物質の付加は、海洋プレートが誕生されてから海溝に到達するまでの履歴を記録した岩石群を形成する。これらの岩石群は、下位から上位に向かって、海洋底を構成する火成岩、遠洋性堆積物（チャートや石灰岩）、海溝充填碎屑性堆積岩（ほとんどが砂岩、泥岩／頁岩）よりも、海洋プレート層序（Ocean Plate Stratigraphy: OPS）と呼ばれてきた。OPS の付加の過程で、メガスラストの滑りは覆瓦状断層や広範囲に渡る歪でまかなわれ、OPS が圧縮・繰り返す一方、異なる時期に付加した OPS は非付加体メガスラスト層準（non-accretionary megathrust horizons）によって隔てられている。カリフォルニアのフランシスカン沈み込みコンプレックスは、1.5 億年以上の期間に渡って間欠的に付加したもので、非付加体メガスラスト層準により隔てられたさまざまな特徴をもつ OPS ユニットを取り込んでいる。フランシスカン OPS のほとんどは、下位より、中央海嶺玄武岩（MORB）、チャート、海溝充填碎屑性堆積岩から構成されている。海溝充填碎屑性堆積岩は様々な割合を持つタービダイトと珪長質碎屑物や蛇紋岩の基質を有するオリストストローム（堆積性メランジュ）で構成されている。量的には、ほとんどのフランシスカン OPSにおいて海溝充填堆積物が卓越するが、火成岩や遠洋性堆積岩が卓越するユニットもある。石灰岩に覆われた海洋島玄武岩や深海性の蛇紋岩化した橄欖岩のスラブは、MORB- チャート集合体よりも少ない。最も初期に付加した OPS は、沈み込み帶域（supra-subduction zone）に類した場で形成されたメタベイサイトによりなり、これは少量の変塩基性岩や変チャートが覆瓦状になっているが、碎屑岩の要素を含まない。[KU1] フランシスカン OPS の変形の大部分は、広範囲に渡る歪の分散というよりむしろ断層沿いに局所化している。この変形により部分的にブロック・イン・マトリックス構造を有する構造性メランジュが生じているが、碎屑性 OPS の要素の一部を構成する堆積性メランジュと対照的である。そのような構造性メランジュは、オリストストローム由来のブロックや基質を含んでいる可能性がある。フランシスカンにおける沈み込みと OPS の付加は、約1.65～1.7億年前に島弧地殻において始まり、数千万年間に渡る付加がほとんどしくは全くない期間を経た後に、中央海嶺玄武岩や海洋性玄武岩が付加した。沈み込み開始に引き続き、海嶺が海溝に近づくが、1.2～1.25億年の沈み込み前に休止し、その後、0.95億年前までに、沈み込んだ海洋地殻の年代が次第に古くなっていた。0.95億年前以降、太平洋 - ファラロン拡大軸が到達して沈み込みが停止し、トランスマント型プレート境界に変化するまで、海洋地殻の年代は次第に若くなっていた。



沈み込み帯周辺で見られる海洋プレート層序の付加作用を示した地殻断面模式図。

日本語原稿執筆者：針金 由美子（産業技術総合研究所 地質情報研究部門）（敬称略）

論文出版日：2017/7/7

<https://doi.org/10.1186/s40645-017-0132-y>



## Review

## Solid earth sciences

## 伊豆・小笠原・マリアナ弧の沈み込み初期過程に着目したフィリピン海プレートの誕生、進化、消滅

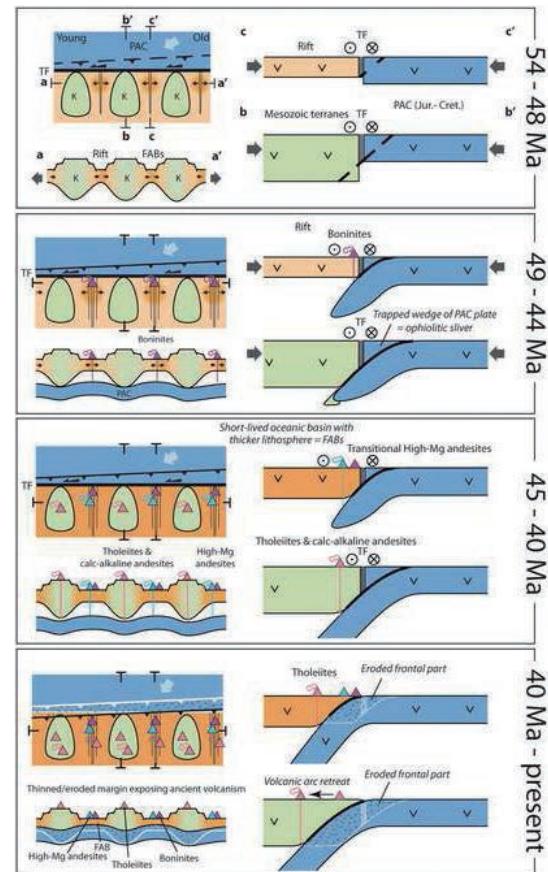
Lallemand S

## Philippine Sea Plate inception, evolution and consumption with special emphasis on the early stages of Izu-Bonin-Mariana subduction

Lallemand S

**[Keywords]** Philippine Sea Plate, Izu-Bonin-Mariana, subduction initiation, boninite, fore-arc basalt, serpentinite mud volcano, back-arc basin, transform fault, arc terrane, plume-ridge interaction

フィリピン海プレートに関する従来の研究成果を総括し、その結果に基づいてこれまで提唱されてきたフィリピン海プレート形成モデルを検証した。その結果、フィリピン海プレートの地史は、以下のようにまとめられる。(1) 60~65Ma (6500~6000万年前)頃にイザナギスラブが東アジア縁辺下で剥落したことにより、沖大東プルームの形成、古フィリピン海プレート（中生代に存在）の分裂、古フィリピン海プレートと太平洋プレートの境界をなしていたトランスフォーム断層での収束運動の開始、伊豆・マリアナ・小笠原弧の沈み込みの開始という一連の過程を経て、最終的にフィリピン海プレートの誕生に至った。(2) 古フィリピン海プレートの初期分裂は54~48Maにプルーム活動の影響下で起こり、長寿命の西フィリピン海盆やその他の短命の海盆群が形成された。これらを構成していた地殻の一部は“前弧玄武岩”と称されている。(3) 古トランスフォーム断層境界で地殻の短縮がはじまり、やがて52~50Maには太平洋プレート内部に逆断層が生じて、太平洋プレートは新しく生まれたフィリピン海プレートの下へ沈み込みを開始した。当時のフィリピン海プレートは、厚い中生代の地殻と薄い海洋リソスフェアとで構成されていた。(4) 49~48Ma頃に発生した最初のマグマはボニナイトマグマであった。上盤プレート上の海底拡大軸近傍に存在していた若い海洋性地殻の下で、沈み込みはじめた太平洋の地殻の脱水が起りマントルコーナーの浅い部分から上昇したマグマである。(5) 太平洋の地殻が地下深部まで達し、上盤側の海盆部も冷えてリソスフェアが厚くなった44~45Ma頃、噴出する溶岩の組成は高マグネシア安山岩へ、さらに島弧ソレアイト、カルクアルカリ系列安山岩へと変わっていった。(6) 新第三紀の間に伊豆・小笠原・マリアナ弧の前面150~200km分は造構性浸食によって削られ、当初フィリピン海プレートに付加していた太平洋オフィオライトの大半もしくはすべては失われた。その結果、現在の海溝陸側斜面では、前弧玄武岩、ボニナイト、初期の火成岩類が露出している。(7) マリアナ前弧で見られる蛇紋岩泥火山は古フィリピン海プレートと太平洋を分けていたトランスフォーム断層の上に形成された可能性がある。



IBM（伊豆小笠原マリアナ）弧の沈み込み開始と初期進化の概念モデル。多様な火成活動を地球ダイナミクスの視点を強調して示した。“40Ma-present”（4000万年前～現在）の図中の白線は、それ以前“40-45Ma”（4500~4000万年前）のプレート境界と上盤プレート下面の位置を示す。

TF: トランスフォーム断層, PAC: 太平洋, FAB: 前弧玄武岩

日本語原稿執筆者：沖野 郷子（東京大学 大気海洋研究所 海洋底科学部門）（敬称略）

論文出版日：2016/5/12

<https://doi.org/10.1186/s40645-016-0085-6>



## 高圧における金属鉄の音速：その実験的制約と外挿、そして地震学モデルとの比較

Antonangeli D, 大谷 栄治

### Sound velocity of hcp-Fe at high pressure: experimental constraints, extrapolations and comparison with seismic models

Antonangeli D, Ohtani E

**[Keywords]** Sound velocity measurements, High pressure, hcp-Fe, Extrapolation schemes, Earth's inner core, Comparison with seismic models

極端温度圧力条件下における鉄の音速の決定は、地球のコアの地震学的情報を解釈するうえで不可欠なことであるが、実験的に非常に困難な課題である。ここでは、hcp- 鉄（六方最密充填構造(hexagonal close-packed, hcp) にある鉄）の縦波速度に焦点を絞り、金属鉄合金のメガバールに及ぶ超高压下で音速を測定する様々な技術・方法について概説した。

これまで報告してきた高圧下における密度・地震波速度の測定値は、用いられた圧力スケールや密度を求めるための状態方程式に違いがあり、そのまま比較することができない点に注意すべきである。ここでは、これらの問題点に留意して、これまで様々な方法で測定してきた室温高圧下での hcp- 鉄の縦波速度と密度について、共通の圧力スケールと状態方程式を用いて校正し直し、比較することによって、縦波速度と密度の圧力依存性と密度依存性についての基準となる関係式を求めた。

この関係式は、地震波モデルと比較するために必要な、hcp- 鉄の縦波速度と密度の温度依存性、融点近傍効果、ニッケルや軽元素の存在などの複雑な効果をより正確に評価して、最終的に信頼できる内核の化学組成を制約するために重要な基準となる。

日本語原稿執筆者：大谷 栄治  
 (東北大学大学院理学研究科) (敬称略)

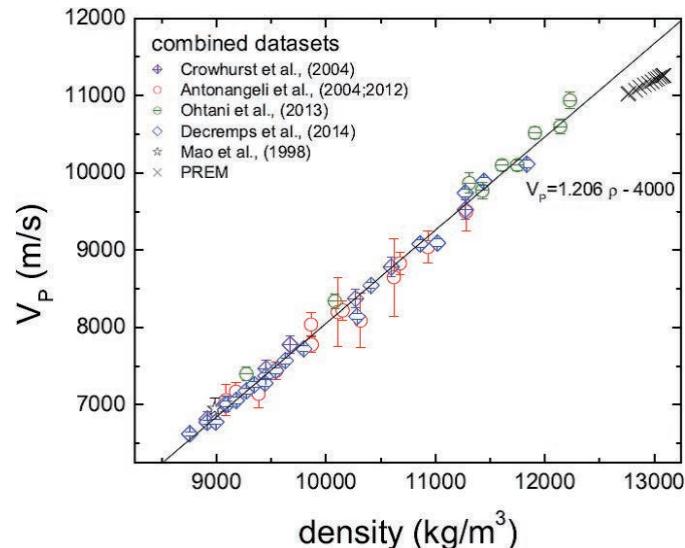


図1：様々な実験について、同じ圧力スケールと状態方程式に基づいた室温での hcp 鉄の密度と縦波速度との関係。これまでの実験結果は良い一致を示す。

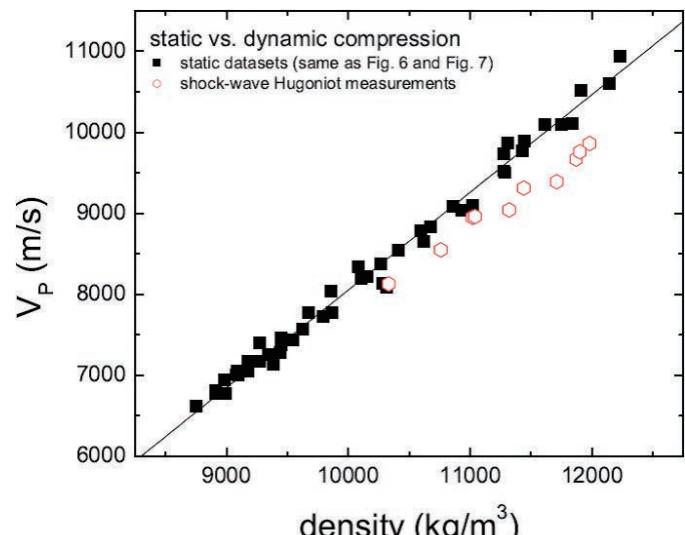


図2：静的な実験(300K)と衝撃波実験(ユゴニオ)によって得られた金属鉄(hcp- 鉄)の音速と密度の関係の比較。密度と縦波速度の関係(バーチの法則)の温度依存性を示す。



## 結合ライブラリ Jcup3: その思想と応用

荒川 隆, 井上 孝洋, 八代 尚, 佐藤 正樹

### Coupling library Jcup3: its philosophy and application

Arakawa T, Inoue T, Yashiro H, Satoh M

[Keywords] Earth system modeling, Coupler, Coupled simulation

現代の気候・気象シミュレーションでは大気や海洋などの複数のモデルコンポーネントが必要な情報を相互に交換しつつ計算を実行するような形態をとることが一般的である。これらのモデルコンポーネントはそれが表現する物理現象の特性に応じた時空間スケールを持つため、モデルの結合においては適切な時間間隔で適切な格子変換を行いデータ交換するソフトウェアが求められる。結合ライブラリ Jcup は気候・気象シミュレーションを主対象とした汎用結合ソフトウェアである。高い汎用性を確保し利用の利便性・安全性を担保するため、プログラム内部の処理を「値を変化させない処理」と「値を変化させる処理」に2分し、値を変化させる処理を利用者に対して可視化したことが Jcup の先進性である。具体的には Jcup は以下の2つの特徴をもつ。

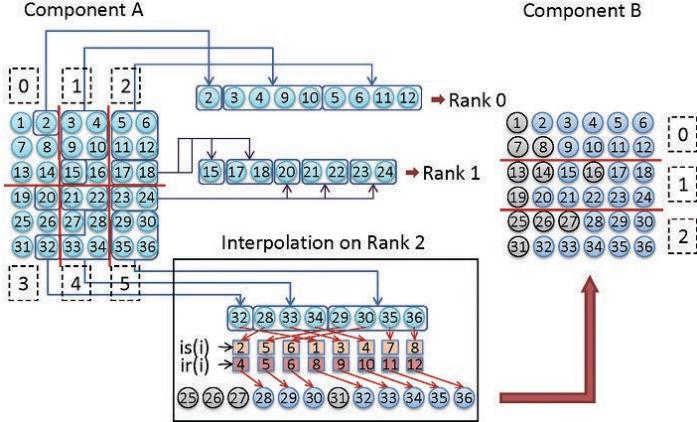
1) 格子形状ではなく各モデルプロセスが担当する格子点の番号および補間計算時の格子点の対応関係を入力情報として与える。

2) 補間計算コードを利用者が自由に実装できる。

図に示した Jcup のデータフローでは四角で囲んだ補間計算部分が値を変化させる処理に該当し、この部分の計算コードを利用者が実装できるように設計されている。

適用事例として気候モデル MIROC の大気海洋結合、大気モデル NICAM- 海洋モデル COCO 結合、NICAM-IO コンポーネント結合、地震モデル - 構造物モデル結合の4ケースを紹介した。MIROC 大気海洋結合は補間計算コードを自由に実装できるという Jcup の特徴によって結果に影響を及ぼすことなく既存の結合プログラムを置換した事例である。NICAM-COCO 結合は格子系に依存しないという Jcup の特徴によって従来にない複雑な格子系のモデルも結合できた事例、NICAM-IO コンポーネント結合は補間計算コード実装によって複数の補間方法を容易に組み込む事ができた事例である。地震 - 構造物モデル結合は気候・気象分野のモデルだけでなく構造物モデルのような非構造格子に対しても結合条件に応じて柔軟に対応可能であることを示した事例である。

日本語原稿執筆者：荒川 隆（高度情報科学技術研究機構）（敬称略）



Jcup のデータ交換ダイアグラム。灰色の丸はマスク値で、これらの値は通信されないようにになっている。四角で囲まれた部分が補間計算で、計算コードを利用者が実装可能なように設計されている。

論文出版日：2020/2/6

<https://doi.org/10.1186/s40645-019-0320-z>



## 北ユーラシア未来イニシアティブ (NEFI)：21世紀における全球変化に向けた挑戦と道筋

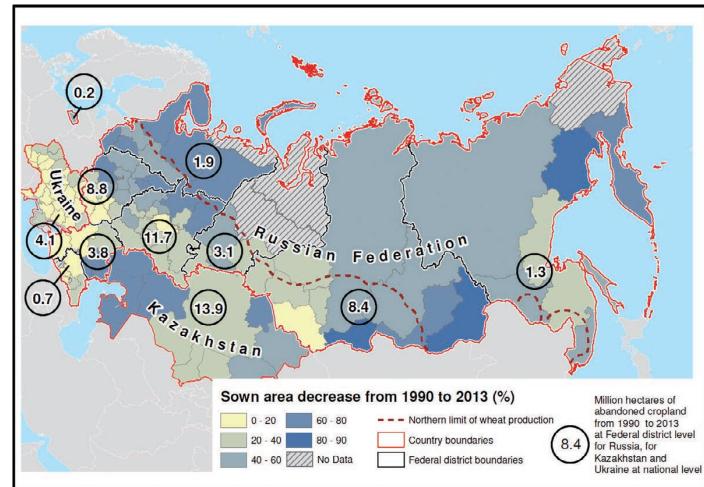
Pavel Groisman et al.

### Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century

Pavel Groisman et al.

**[Keywords]** Environmental Changes, Northern Eurasia, Ecosystems dynamics, Terrestrial water cycle, Cryosphere retreat, Extreme and inclement environmental conditions, Sustainable development, Land-cover and land-use change, Integrated assessment models for decision-makers

過去数十年間、地球システムは大きく変化し、それは特に北ユーラシアで顕著であった。北ユーラシアの大団の社会経済変化もこの地域に多様な環境変化をもたらし、全球の環境変化に結びついた。北ユーラシア未来イニシアティブ (NEFI) は、北ユーラシア地球科学連携イニシアティブ (NEESPI) の後継として計画され、2004年に発足した。NEESPIは進行中の環境変化を明らかにしようと計画され、その結果を社会に知らせ、将来の社会の発展に役立てることを目的とした。NEFIは、環境や社会組織の変化に直面しながらも、地域的な政策決定者が科学的知見を用いて社会の発展に導けるよう手助けすることを主眼に活動している。NEESPIの研究成果、データ、モデルといった知的基盤は、NEFIの活動を支えるものである。本論文は、それらの知的財産に基づいたNEFIの研究のビジョンを示すものである。そして北ユーラシアを対象とした最近の研究事例を示し、NEFIの新たな科学的目標を定めるものである。これらの科学的目標を設定するために、研究の焦点を9つ提示し、それらを選択した経緯を解説する。9つの研究の焦点とは、北極の温暖化、極端事象の頻度・分布・強度の変化、雪氷の減少、陸域水循環の変化、生物圏の変化、土地利用の圧力、インフラの変化、環境変化に対する社会の応答、そして、全球地球システムにおける北ユーラシアの役割の定量評価、である。北ユーラシアにおける地球システムと人間システムとの強力なフィードバックループによって生じた環境変化（例えば、大規模な原野火災、干ばつ、水資源としての雪氷圈の衰退、海氷の減少）は、過去から現在に至る人間活動（例えば、大規模な水利用、土地利用や統治機構の変化）の結果であり、将来の新たな人間活動の可能性を制限し、あるいは与えるものとなる。したがって我々は、全球地球システム変化を定量評価するための統合評価モデルの必要性を強調する。NEFIによるモデリングは、北ユーラシアの環境変化に対する社会経済的な行動を決定する際に利用され、緩和と適応の努力の証拠を示すことを可能とする。



旧ソビエト連邦（ロシア・ウクライナ・カザフスタン）における1990年から2013年までの農耕地の変化。この間の耕作放棄地は、ロシアで40メガヘクタール、ウクライナで5.4メガヘクタール、カザフスタンで13メガヘクタールである。

日本語原稿執筆者：檜山 哲哉（名古屋大学 宇宙地球環境研究所）（敬称略）

論文出版日：2017/12/27

<https://doi.org/10.1186/s40645-017-0154-5>



## ヒマラヤ西部における新生代気候とテクトニクス

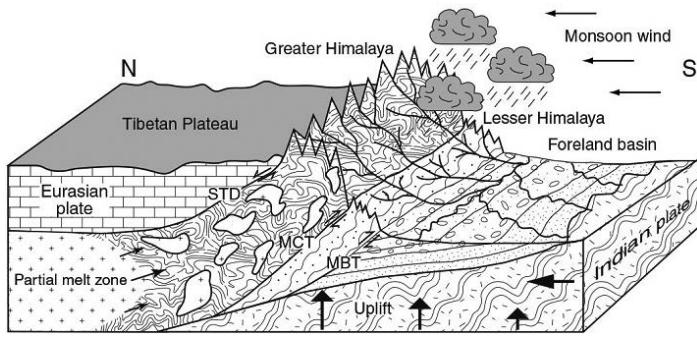
Clift P D

### Cenozoic sedimentary records of climate-tectonic coupling in the Western Himalaya

Clift P D

**[Keywords]** Monsoon, Climate-tectonic, Himalaya, Erosion, Exhumation, Arabian Sea, Foreland basin, Provenance, Geochemistry, Cenozoic, Weathering

ヒマラヤ前縁盆地およびインダス海底扇状地の堆積物は、新第三紀におけるモンスーンの強度変化がヒマラヤ西部における侵食やテクトニクスの発達にどのように影響を与えたかについての最も詳細な記録を与えてくれる。白雲母のAr-Ar年代は、ヒマラヤにおける急速な削剥が、ヒマラヤ中央部(10-25 Ma)より西部(20-35 Ma)において早かったことを示しているが、それはおそらく、リソスフェア下部からスラブが剥離することに起因するヒマラヤ山脈の隆起が西部においてより早く開始したことと、それに伴って夏季モンスーンが強化した結果と推定される。17 Ma以降に削剥速度が減少したが、これは山脈の隆起が遅くなったためであり、気候変動とは無関係であると思われる。一方、6-8 Maに起きたさらなる削剥速度の減少は、前縁盆地における炭素同位体のデータやオマーン沖のODP Site 730から得られたヘマタイトゲータイト記録に示される夏季降水量減少の時期と一致している。一般に、乾燥化は風が強くなるにつれて進行することから、6-8 Maの乾燥化は全球的な寒冷化とリンクしたものと解釈される。中新世後期におけるこうしたモンスーン降水の衰退は、熱帯集束帯(ITCZ)の南下および小ヒマラヤにおける侵食速度の増加と同時期である。9 Ma以後に開始した小ヒマラヤ内帯におけるアンルーフィング(上面からの削剥により、より深部が露出する事)は、侵食が狭い範囲に集中したことによって引き起こされたデュープレックス構造形成の結果として起こったものだが、小ヒマラヤ内帯の広範囲な露出は6 Ma以後まで遅れた。5 Ma以後に起きたインダス川堆積物のネオジム同位体比の平均値の減少は、河川争奪による大規模な流域の獲得というよりは、むしろ、ナンガ・パルバット・マッシフにおけるアンルーフィングと共に起きた小ヒマラヤ内帯の露出に起因すると考えられる。



ヒマラヤ山脈の隆起とアジア・モンスーンの関係

日本語原稿執筆者：王 可（東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻）（敬称略）



## アジア・モンスーンの進化と変動、ヒマラヤ・チベット高原隆起とのリンクエージの可能性

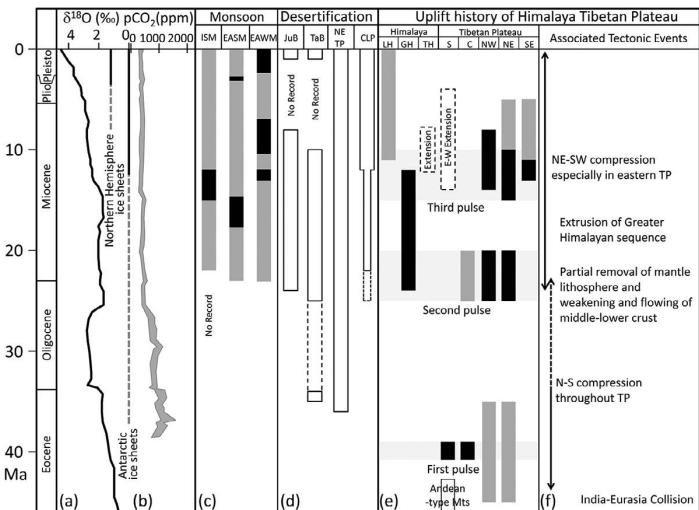
多田 隆治, 郑 洪波, Clift P D

## Evolution and variability of the Asian monsoon and its potential linkage with uplift of the Himalaya and Tibetan Plateau

Tada R, Zheng H, Clift P D

**[Keywords]** East Asian summer monsoon, East Asian winter monsoon, Indian summer monsoon, Himalaya, Tibetan Plateau, Chinese Loess Plateau, Climate model, Tectonic-climate linkage, Westerly jet, Desertification

ヒマラヤ山脈-チベット高原の隆起とアジア・モンスーンの成立・強化の間の関係は、固体地球のテクトニクスと気候変動のリンクエージの典型例と見なされているが、それを検証するに必要なデータが不十分であったために長らく未解明な問題であった。しかしながら、この問題に関する私たちの理解はここ10年で著しく進み、状況は急速に変わりつつある。そこで本論文では、始新世以降のヒマラヤ・チベットの隆起過程、その影響を評価しようとした気候モデルシミュレーション結果、そして古気候記録に基づくインド及び東アジア・モンスーンの時空変動復元に関する最近の研究成果を取りまとめた。先ず、ヒマラヤ・チベットの隆起は、(1) 40~35Maにおける南部～中部チベットの隆起、(2) 25~20Maにおける北部チベットの隆起、(3) 15~10Maにおける北東部～東部チベットの隆起、の3段階で起こったことが示された。一方、気候モデルからは、(i) 南部～中部チベットの隆起がインド夏季モンスーンとソマリジェットの強化を、(ii) 北部チベットの隆起が東アジア夏季及び冬季モンスーンの強化とアジア内陸部の砂漠化を、そして(iii) 北東部～東部チベットの隆起が東アジア夏季及び冬季モンスーンの更なる強化を引き起こしたことが予想されている。そこで、ヒマラヤ・チベットの隆起史と各隆起段階に対応した気候モデルシミュレーション結果の妥当性を、モデルによる予想と古気候データを比較することで検証した。40~35Maにおける南部～中部チベットの隆起に伴うインド夏季モンスーンおよびソマリジェットの強化については、これを検証するに十分な古気候データが未だ存在しない。しかしながら、隆起に伴う侵食と化学風化の強化が、大気中の二酸化炭素濃度を低下させ、地球の寒冷化を引き起こした可能性がある。一方、25~20Maにおける北部チベットの隆起に伴う東アジア夏季及び冬季モンスーン強化とアジア内陸部砂漠化については、古気候データはそれらを強く支持した。最後に、15~10Maにおける北東部～東部チベットの隆起のアジア・モンスーンへの影響については、この時期が南極氷床の拡大と全球的な寒冷化の時期に重なり、寒冷化もモンスーンに影響を与える可能性が高いため、ヒマラヤ・チベットの隆起がモンスーンに与える影響を分離、評価することが難しい。



新生代におけるアジア・モンスーンの時代変化、内陸部砂漠化、ヒマラヤ・チベット高原隆起、そしてそれらと地球環境変化の関わり。(a) 底生有孔虫殻の $\delta^{18}\text{O}$  (Zachos他, 2001を改訂)、(b) 大気二酸化炭素濃度 (Zhang他, 2013を改訂)、(c) アジア・モンスーン強度、(d) 内陸部砂漠化、(e) ヒマラヤ・チベット高原隆起、(f) 関連するテクトニック・イベントの時代変化を示している。(c) と (e) における灰色のバーは弱い活動、黒いバーは強い活動を示している。(d) における JuB はジュンガ盆地、TaB はタリム盆地を意味する。

日本語原稿執筆者：多田 隆治（東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻）（敬称略）

論文出版日：2016/2/9

<https://doi.org/10.1186/s40645-016-0080-y>

## 古海洋学・古気候学研究への海底テフラの利用：日本海堆積物を例として

池原 研

## Marine tephra in the Japan Sea sediments as a tool for paleoceanography and paleoclimatology

Ikehara K

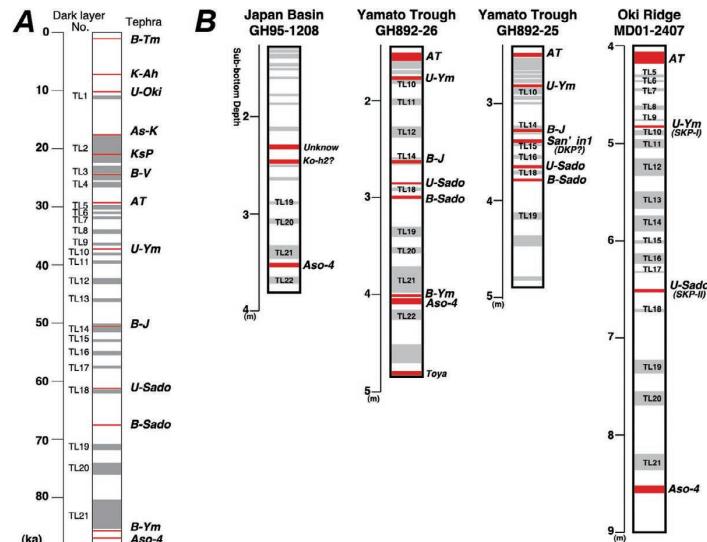
[Keywords] Tephra, Key bed, Japan Sea, Stratigraphy, Chronology, Paleoceanography

テフラは大噴火の産物であり、給源火山から数千km離れた場所にも堆積する場合がある。テフラは陸域、湖沼域、海域、雪氷域などの異なる環境下にも同時に堆積するので、地質学的に非常に重要な同時面となる。プレート境界域の変動帯に位置する日本列島には多数の火山が存在し、日本列島とその周辺海域にテフラを供給してきた。したがって、これらのテフラを正確に同定・対比することで異なる環境あるいは地点間の堆積物記録を比較することが可能である。また、連続した堆積物である海底堆積物中のテフラを十分に活用することで、より正確な層序モデルの構築が可能である。特に、明暗互層で特徴づけられる日本海堆積物では、テフラを介して、より正確な層序対比が可能である一方、特徴が似た別のテフラを暗色層層序との関係から区別することも可能である。したがって、日本海堆積物中のテフラ層序はより精度の高いものとなりうる可能性がある。さらに、テフラの化学組成の時空間変化は島弧域のマグマ進化の記録であり、広域的なテクトニクスとの関係を論じられる可能性をもつ。

古気候学的には、テフラは異なる環境下での古気候イベントをつなぐ鍵層となる。例えば、琵琶湖や水月湖などの湖沼堆積物の古気候記録と日本海堆積物中の古気候記録の前後関係あるいは同時性をテフラを介して比較することは汎世界的な気候変動様式の理解の上でも重要である。また、陸域と海域において同一のテフラの放射性炭素年代を比較することは、海洋レザバーの時空間変化を知る一つの方法である。海洋レザバー値は海洋循環などの影響を受けるため古海洋変動解明に有用であるほか、より正確な古気候イベント発生時期の特定のためにも重要である。

このように、テフラは層序学、年代学、火山学のみならず、古海洋学や古気候学の上でも重要である。

日本語原稿執筆者：池原 研（産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門）（敬称略）



日本海の後期第四紀のテフラと暗色層層序の関係（A）とそのもととなつたコア中の酸素同位体ステージ3-5.3のテフラの挿在状況（B）



## 鮮新世から現世までの黒潮と対馬海流の歴史：マルチプロキシーアプローチ

Gallagher S J, 北村 晃寿, 井龍 康文, 板木 拓也, 小泉 格, Hoiles P W

## The Pliocene to Recent History of the Kuroshio and Tsushima Currents: a multi-proxy approach

Gallagher S J, Kitamura A, Iryu Y, Itaki T, Koizumi I, Hoiles P

**[Keywords]** Kuroshio Current, Tsushima Current, Pliocene, Pleistocene, Holocene, Paleoceanographic proxies, Biogeography, Microfossils, Macrofossils, Geochemistry

黒潮は北太平洋亜熱帯循環に支配された大規模な西岸境界流であり、インドー太平洋暖水プールから温暖な亜熱帯海水を日本にもたらし、アジアの気候を支配する主因の一つである。対馬海流は、黒潮の分枝流で、日本海に温暖な海水をもたらす。本論では、これらの海流の地質学的時間スケールでの歴史を解明するために様々なプロキシーを使う。サンゴ礁、ベッドフォーム、堆積物の供給源や分級度などの堆積学的プロキシーは、過去の海流の強度や緯度を示す。サンゴ群集や貝類群集などのプロキシーは、過去の沿岸流の動態を示す。微化石群集（浮遊・底生有孔虫、珪藻、放散虫やコッコリス）や有機物・無機物の地球化学分析は、海成層に記録された過去の表層海水温や塩分の歴史を解明できる。熱帯の花粉、微化石の日本への運搬とインドー太平洋の無脊椎動物の日本への移動も過去の海流の動態を表す。これらのプロキシーの層位分布は、黒潮が約3Maまでには、現在の緯度（北緯35度）に到達していたことを示す。この時期の日本周辺は現在よりも水温が1-2°C低かった。一方、この時期の南方海峡を越えた対馬海流は弱かったが、約2Ma（詳しく言うと1.7Ma、海洋酸素同位体ステージ59）までに南方海峡が地殻の伸張で形成された。そして、それ以降、間氷期ごとに対馬海流が日本海に流れ込むようになった。約1Maの氷期一間氷期サイクルの強化は、北太平洋亜熱帯循環と黒潮を強化した。これは、琉球列島のサンゴの拡大のトリガーとなり、サンゴ礁は現在の緯度まで到達した。その後、サンゴ礁の北限は間氷期には北緯31度に達し、氷期には北緯25度に後退するという変動を繰り返した。浮遊性有孔虫のプロキシデータは、最終氷期最盛期では、東台湾海峡が狭くなるため、北緯24度で、黒潮の流路が現在の流路から東にそれで太平洋に向かうことを示す。その後、黒潮の流れは、完新世の間に、現在の位置にもどる。しかし、海洋モデルと地球化学プロキシーは、黒潮の流路は氷期と間氷期を通じて同じだったことを示すが、氷期の流路については検討の余地がある。未来の気候変動に伴う海流の動態を予測する際には、過去に起きた類似の現象は重要な研究対象となるが、その目的に使うには北太平洋に関する研究は十分ではない。未来の地球温暖化への黒潮の応答のモデリングは、黒潮の速度が0.3m/sまで増加し、黒潮統流が0.5度北に移動することを示す。

日本語原稿執筆者：北村 晃寿  
(静岡大学 大学院 理学研究科 地球科学専攻) (敬称略)

<https://doi.org/10.1186/s40645-015-0045-6>

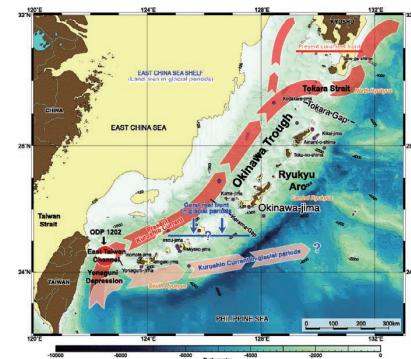


図1：沖縄周辺海域における黒潮の流路ならびに琉球サンゴ礁の氷期と間氷期における北限の予測位置。

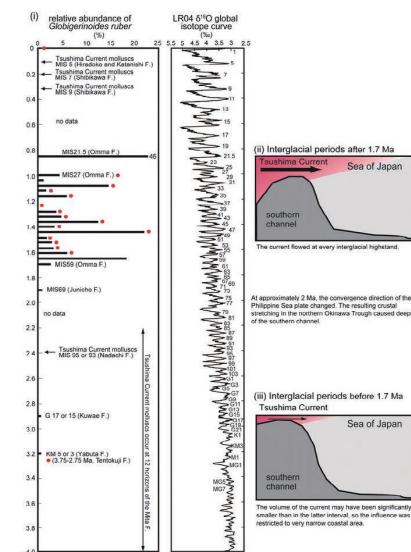


図2：(i) 本州の日本海沿いに露出する鮮新統・第四系における対馬海流指標の浮遊性有孔虫 *Globigerina ruber* の層位分布と同時代の酸素同位体変動曲線 LR04 カーブ。1.6~1.0Ma の赤丸は、Hoiles et al. (2012) が報告した大桑層の化石記録に基づくインドー太平洋暖水プールに生息する底生有孔虫が産出した間氷期を示す。0Ma と~3Ma の赤丸は、Gallagher et al. (2009) によるインドー太平洋暖水プールに生息する底生有孔虫の産出記録である。(ii) は1.7Ma 以降の間氷期の高海水準期の日本海南方海峡の状態を示す。(iii) は1.7Ma 以前の間氷期の高海水準期の日本海南方海峡の状態を示す。